



Escola Universitària d'Enginyeria  
Tècnica Industrial de Barcelona  
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

**Memòria**



# **"APROFITAMENT DE L'ENERGIA DE L'ENTORN MITJANÇANT PIEZOELÈCTRICS"**

PFC presentat per optar al títol d'Enginyeria Tècnica  
Industrial especialitat ELECTRICITAT  
per **Roger Aldomà Mas**  
**Marc Ribera Llimós**

Barcelona, 15 de Juny de 2011

Director: Jose López López  
Departament de Física i Enginyeria Nuclear (FEN)  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

## Índex Memòria

Resum.....	6
Resumen.....	6
Abstract.....	6
<b>CAPÍTOL 1: INTRODUCCIÓ.....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTOL 2: OBJECTE DEL PROJECTE.....</b>	<b>8</b>

### BLOC I: BASES TEÒRIQUES

<b>CAPÍTOL 3: INTRODUCCIÓ AL BLOC I.....</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTOL 4: CONCEPTES BÀSICS SOBRE LA PIEZOELECTRICITAT.....</b>	<b>11</b>
4.1. L'efecte piezoelectric. ....	11
4.2. Classificació. ....	12
4.3. Polarització. ....	12
4.4. Principals equacions dels materials piezoelectrics. ....	13
4.4.1. Sistema d'eixos.....	13
4.5. Principals Constants piezoelectriques.....	14
4.5.1. Coeficient de deformació piezoelectrica, d. ....	14
4.5.2. Coeficient de pressió piezoelectrica, g. ....	14
4.5.3. Factor d'acoblament, k.....	14
4.5.4. Temperatura de Cuire, Tc.....	14
4.5.5. Constant de freqüència, N. ....	14
4.5.6. Límit de tensió dinàmic. ....	14
4.6. Circuit equivalent d'un Piezoelectric.....	15
4.6.1. Freqüència de ressonància: ....	15
<b>CAPÍTOL 5: PIEZOELECTRICS MULTICAPA.....</b>	<b>16</b>
5.1. Piezoelectrics multicapa. ....	16
5.2. El coeficient $d_{33}$ en els piezoelectrics multicapa. ....	17
5.3. La capacitat en els piezoelectric multicapa. ....	18
<b>CAPÍTOL 6: ASSOCIACIÓ DE PIEZOELECTRICS.....</b>	<b>19</b>
6.1. Introducció. ....	19
6.2. Modelització d'un element piezoelectric.....	20

6.3.	Associació d'elements piezoelèctrics. ....	21
6.3.1.	Associació en sèrie. ....	21
6.3.2.	Associació en paral·lel. ....	22
6.3.3.	Associació mixta. ....	23
6.4.	Conclusions. ....	28
<b>CAPÍTOL 7: CIRCUIT DE CONDICIONAMENT.....</b>		<b>29</b>
7.1.	Concepte de capacitat interna i condensador d'emmagatzematge. ..	29
7.2.	La transferència d'energia pas per pas. ....	31
7.3.	Circuits de condicionament .....	32
7.3.1.	Circuits passius. ....	32
7.3.2.	Circuits actius. ....	33
 <b>BLOC II: DESENVOLUPAMENT D'APLICACIONS</b>		
<b>CAPÍTOL 8: INTRODUCCIÓ AL BLOC II.....</b>		<b>36</b>
<b>CAPÍTOL 9: PLANTEJAMENT I SELECCIÓ D'HIPÒTESIS.....</b>		<b>37</b>
9.1.	Macrogeneració. ....	38
9.1.1.	Obtenció d'energia a partir del caminar de les persones. ....	38
9.1.2.	Obtenció d'energia a partir de la circulació de vehicles en carrers i carreteres. ....	38
9.1.3.	Obtenció d'energia a partir de les turbulències provocades per vehicles. ....	38
9.1.4.	Arbre piezoelèctric. ....	38
9.1.5.	Aprofitament de l'energia de la pluja. ....	38
9.2.	Microgeneració .....	39
9.2.1.	Augment de l'autonomia de la bateria d'un PC portàtil. ....	39
9.2.2.	Augment de l'autonomia d'un teclat inalàmbic. ....	39
9.2.3.	Sensors autònoms. ....	39
9.2.4.	Augment de l'autonomia d'un telèfon mòbil. ....	39
<b>CAPÍTOL 10: DESENVOLUPAMENT DE L'APLICACIÓ DEL TELÈFON MÒBIL.....</b>		<b>40</b>
10.1.	Descripció de l'aplicació. ....	40
10.2.	Recol·lecció d'energia a través del telèfon mòbil. ....	41
10.3.	Estudi previ. ....	41
10.3.1.	Estudi del medi. ....	41
10.4.	Estudi físic sobre la butxaca com a medi de transport. ....	42
10.4.1.	Estudi del medi. ....	42

10.4.2.	Càlculs sobre la força que rep un telèfon mòbil als ser transportat a la butxaca. ....	43
10.5.	Estudi físic sobre la bossa de mà com a medi de transport. ....	46
10.5.1.	Estudi del medi. ....	46
10.5.2.	Càlculs sobre la força al transportar un telèfon mòbil en una bossa de mà.....	46
10.6.	Estudi físic sobre la utilització del telèfon mòbil. ....	49
10.6.1.	Estudi del medi. ....	49
10.6.2.	Càlcul sobre la força exercida al mòbil durant la seva utilització.....	50
10.7.	Quadre resum dels resultat obtinguts. ....	52
10.8.	Càlculs piezoelèctrics aplicació mòbil. ....	52
10.9.	Conclusions i comentaris sobre els resultats. ....	54
<b>CAPÍTOL 11: DESENVOLUPAMENT DE L'APLICACIÓ DE LA PLUJA.....</b>		<b>55</b>
11.1.	Descripció de l'aplicació. ....	55
11.2.	Estudi físic sobre les gotes d'aigua. ....	56
11.2.1.	Estudi del medi. ....	56
11.2.2.	Càlculs sobre els tipus de gotes.....	56
11.2.3.	Càlcul de la Força de les gotes. ....	57
11.3.	Estudi físic sobre els tipus de pluja. ....	61
11.3.1.	Estudi del medi ....	61
11.3.2.	Càlculs sobre el tipus de pluja. ....	62
11.4.	Quadre Resum de les dades obtingudes:.....	63
11.5.	Càlculs piezoelèctrics aplicació pluja. ....	64
11.6.	Conclusions i comentaris sobre els resultats. ....	65
<b>CAPÍTOL 12: DESENVOLUPAMENT DE L'APLICACIÓ DELS COTXES.....</b>		<b>67</b>
12.1.	Descripció de l'aplicació. ....	67
12.2.	Recol·lecció d'energia dels cotxes i vianants d'una ciutat.....	68
12.3.	Estudi físic sobre el vianants.....	68
12.3.1.	Estudi del medi. ....	68
12.3.2.	Càlculs sobre la massa i la força. ....	69
12.4.	Càlculs sobre la massa i la força dels vehicles.....	70
12.4.1.	Determinació de les forces.....	70
12.5.	Càlculs piezoelèctrics aplicació en carrers.....	71
12.6.	Conclusions aplicació cotxes. ....	74
<b>CAPÍTOL 13: CONCLUSIONS GENERALS BLOC II .....</b>		<b>75</b>

### **BLOC III: REPLANTEJAMENT DE LES APLICACIONS**

#### **CAPÍTOL 14: INTRODUCCIÓ DEL BLOC III.....78**

#### **CAPÍTOL 15: PIEZOELÈCTRICS TIPUS BENDER.....79**

- 15.1. Monomorph, Bimorph, Multimorph. ....80
  - 15.1.1. Monomorph. ....80
  - 15.1.2. Bimorph. ....80
  - 15.1.3. Multimorph .....81
- 15.2. Freqüència de ressonància: .....81
- 15.3. Càlculs i simulació de piezoelèctrics tipus Bender. ....82
- 15.4. Tendència cap el Bender. ....82

#### **CAPÍTOL 16: REPLANTEJAMENT DE. LES HIPÒTESIS AMB BENDER..... 84**

- 16.1. Replantejament hipòtesis mòbil. ....84
- 16.2. Replantejament hipòtesis pluja. ....85
- 16.3. Altres idees. ....85
- 16.4. Conclusions. ....86

#### **CAPÍTOL 17: CONCLUSIONS DEL PROJECTE .....87**

#### **CAPÍTOL 18: CONCLUSIONS PERSONALS ..... 89**

#### **CAPÍTOL 19: BIBLIOGRAFIA ..... 91**

- 19.1. Bibliografia de Consulta .....92

## RESUM

El present projecte suposa l'intent de desenvolupar aplicacions de reaprofitament d'energia en el camp de l'*energy harvesting*, utilitzant materials piezoelèctrics. Degut a que els autors del projecte parteixen de zero en quant a coneixement de la tecnologia piezoelèctrica, el primer bloc del projecte és un recull d'informació sobre la piezoelectricitat i, especialment, la seva aplicació en el camp de l'*energy harvesting*. En ell, s'assenten les bases i es realitzen alguns desenvolupaments teòrics que constitueixen el pilar bàsic sobre el qual s'assenta el segon bloc del projecte. En aquest segon bloc, es tracta de plantejar diverses aplicacions possibles i desenvolupar-ne algunes. Arran d'aquest desenvolupament, s'arriba a uns resultats que donen peu a la redacció d'un tercer bloc, en el qual es plasmen una sèrie de consideracions i aspectes a tenir en compte per tal de millorar els resultats obtinguts i, en conseqüència, la viabilitat de les aplicacions desenvolupades. D'aquesta manera, aquest tercer bloc deixa la porta oberta a la continuació del projecte tot marcant-ne la línia a seguir.

## RESUMEN

El presente proyecto supone el intento de desarrollar aplicaciones de reaprovechamiento de energía en el campo del *energy harvesting*, utilizando materiales piezoeléctricos. Debido a que los autores del proyecto parten de cero en cuanto a conocimientos acerca de la tecnología piezoeléctrica, el primer bloque del proyecto es una recopilación de información sobre la piezoelectricidad y, especialmente, su aplicación en el campo del *energy harvesting*. En él, se sientan las bases y se realizan algunos desarrollos teóricos que constituyen el pilar básico sobre el que se sienta el segundo bloque del proyecto. En este segundo bloque, se trata de plantear diversas aplicaciones posibles y desarrollar algunas de ellas. A raíz de dicho desarrollo, se obtienen unos resultados que dan pie a la redacción de un tercer bloque, en el que se plasman una serie de consideraciones y aspectos a tener en cuenta con el fin de mejorar los resultados obtenidos y, en consecuencia, la viabilidad de las aplicaciones desarrolladas. De este modo, este tercer bloque deja la puerta abierta a la continuación del proyecto al mismo tiempo que marca la línea a seguir.

## ABSTRACT

This project is an attempt to develop applications for reuse of energy in the field of energy harvesting, using piezoelectric materials. Because the authors of the project are novice in terms of knowledge about piezoelectric technology, the first block of the project is a compilation of information on piezoelectricity, and especially its application in the field of energy harvesting. It contains basic information and presents some theoretical developments that constitute the basic pillar on which sits the second part of the project. In this second part, the authors try to propose various possible applications and develop some of them. Following this development, we obtain some results that give rise to the redaction of a third block, which set out a series of considerations and important aspects in order to improve the results and, consequently, the viability of the developed applications. Thus, this third group leaves the door open to continuing the project while marking the line to follow.

# **CAPÍTOL 1: INTRODUCCIÓ.**

El control de l'energia, ha aportat a la raça humana innumerables avantatges respecte la resta d'espècies del planeta terra. A grans trets, podríem dir que el primer "control" energètic fou el del foc, més endavant les màquines de vapor, l'electricitat etc.

Ara i sempre la raça humana necessita energia per sobreviure i evolucionar com a espècie, no obstant, aquesta no sempre ha estat conscient del risc que comporta generar productes necessitats d'energia i abastir-ne tota la humanitat. Si aquesta consideració l'hi afegim el fet plausible que any rere any augmenta la població mundial, arribem a la conclusió de que l'energia és un bé molt preuat per a la humanitat i que és necessària una molt bona gestió energètica.

Qui més qui menys sap que l'energia no es crea ni es destrueix sinó que es transforma, ara bé transformar-la no sempre surt tant a compte com pensem. Algunes solucions poden ser "barates" a nivell econòmic però molt cares mediambientalment parlant, exemples en són el canvi climàtic i l'esgotament de recurs fòssils. Aleshores entrem en un sense sentit, on per poder viure millor ens cal energia, i per obtenir aquesta energia destruïm el nostre entorn.

Per a trobar solucions a aquest dilema cal pensar, cal imaginar, cal superar entrebancs, cal aprendre, cal estudiar. Els autors d'aquest projecte ho hem fet i ens ha sorgit una idea, utilitzar l'efecte piezoelèctric per a la generació d'energia elèctrica. Sabem que els materials piezoelèctrics no són cap panacea no obstant creiem que pot ser un bon punt de partida per a construir alternatives energètiques que satisfacin part de les nostres necessitats.

# **CAPÍTOL 2: OBJECTE DEL PROJECTE.**

Aquest projecte de final de carrera té com a objecte la recerca en el camp de la recol·lecció d'energia a partir de fonts alternatives (*Energy Harvesting*). Concretament s'estudiarà el fenomen de la piezoelectricitat així com les seves possibles aplicacions en el camp de la recol·lecció d'energia de l'entorn.



# **Bloc I: Bases teòriques.**

# **CAPÍTOL 3:**

# **INTRODUCCIÓ AL**

# **BLOC I.**

A continuació és presenta el primer Bloc del present projecte, és un bloc on s'ha sintetitzat tota la informació imprescindible per a comprendre el fenomen de la piezoelectricitat i el desenvolupament de les seves aplicacions en aquest projecte.

Hem considerat necessari incloure un bloc d'aquest tipus dins la memòria per varis motius. Primerament per que aquest projecte és en part un projecte d'investigació i com a tal hem hagut de cercar informació de diversos àmbits per així adquirir unes bases de coneixement suficients per poder tirar endavant amb el projecte.

Aquesta cerca d'informació ha suposat un considerable esforç, ja que la documentació sobre l'efecte piezoelèctric està molt dispersa i per tant hem agut de fer ús de diverses fonts d'informació (llibres, articles, projectes, catàlegs, documentals, Internet, etc..) per a aconseguir un volum de coneixement suficient com per redactar unes bases teòriques.

Cal afegir que part de la informació més útil de cara el desenvolupament de les aplicacions del Bloc II del present projecte, no ha estat extreta de documents bàsics sobre la piezoelectricitat sinó a través del contacte directe amb empreses i persones que treballen en aquest sector.

Per altre banda la cerca d'informació ens va ocupar quasi la totalitat del temps destinat al PCF1 i conforma el pilar bàsic per de les aplicacions que em estudiat en aquest projecte.

# CAPÍTOL 4:

## CONCEPTES BÀSICS

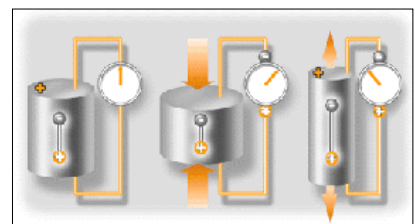
## SOBRE LA

## PIEZOELECTRICITAT.

Aquest capítol, conté les idees bàsiques de l'Annex 1 (Bases teòriques de la piezoelectricitat) en el qual s'explica de forma àmplia i profunda el marc teòric del fenomen piezoelèctric.

### 4.1. L'efecte piezoelèctric.

L'efecte piezoelèctric és un fenomen físic que presenten alguns materials ,aquest efecte consisteix en l'aparició de càrrega elèctrica en les cares del cristall piezoelèctric quan aquest és sotmès a una pressió mecànica. Aquest fenomen s'anomena **efecte piezoelèctric directe**. També hi ha el que s'anomena **efecte piezoelèctric invers** i consisteix en obtenir una deformació del material a partir d'una diferencia de potencial entre les dues cares del material.



*Figura 1: Efecte piezoelèctric directe i invers.*

## 4.2. Classificació.

Quan s'aplica un camp elèctric altern en una ceràmica piezoelèctrica i es mesura la polarització induïda en funció del camp, s'observa el fenomen d'histeresi ferroelèctric. L'àrea interna d'aquesta corba correspon a l'energia dissipada en forma de calor, a causa de les pèrdues mecàniques i dielèctriques.

La classificació principal dels materials piezoelèctrics està basada en gran mesura en l'àrea d'aquesta corba, essent denominats com materials *soft* aquells que presenten una corba d'histeresi tancada, i com a materials *hard*, aquells que presenten una corba d'histeresi oberta. Els materials *Hard* també són anomenats materials d'alta potència i els *Soft*, materials d'alta sensibilitat.

## 4.3. Polarització.

El fenomen de la piezoelectricitat en els materials pot aparèixer de dues maneres de forma natural o artificial. La primera són materials com ara el Quars, què sense patir cap tractament ja posseeixen propietats piezoelèctriques, els artificials en canvi cal sotmetre'ls a un tractament específic per aconseguir-ho, aquest és un procés de polarització.

Així doncs es pot definir la polarització piezoelèctrica, com aquell procés a el qual es sotmet un material ferroelèctric per aconseguir que tingui propietats piezoelèctriques.

El procés de Polarització consisteix en sotmetre un material a un intens camp elèctric de varis milers de volts per centímetre a una alta temperatura (per sobre la temperatura crítica o de Curie) i lentament anar reduint la temperatura tot mantenint el camp elèctric, més tard es retira el camp elèctric, i el material queda polaritzat. El que aconseguim amb aquest procés és que els dominis elèctrics quedin alineats en direcció del camp aplicat, aquest fet és un dels responsables de les característiques piezoelèctriques del material.

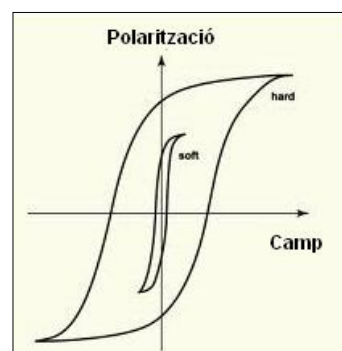


Figura 2: Corba de polarització

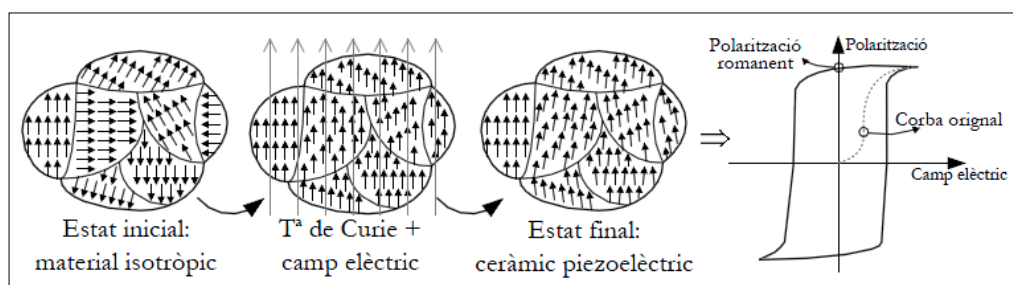


Figura 3: Procés de polarització.

La polarització d'un material és un fenomen reversible si el material polaritzat és sotmès a una temperatura per damunt de la de Curie el material es despolaritza i perd les seves propietats piezoelèctriques.

## 4.4. Principals equacions dels materials piezoelèctrics.

Les equacions constitutives dels materials piezoelèctrics combinen les tensions mecàniques i el camp elèctric descrivint així la deformació i el desplaçament elèctric.

En els materials ordinaris podem descriure la relació entre la deformació y tensió mecànica a partir de la llei de Hooke:

$$S = s \cdot T \quad (1)$$

*S: deformació mecànica [adimensional]*

*s: coeficient d'elasticitat [m<sup>2</sup>/N]*

*T: tensió o esforç mecànic [N/m<sup>2</sup>]*

L'equivalència elèctrica es descriu per la següent formula:

$$D = \varepsilon \cdot E \quad (2)$$

*D: desplaçament elèctric [C/m<sup>2</sup>]*

*ε: constant dielèctrica [permitivitat]*

*E: camp elèctric [V/m]*

Ens els materials piezoelèctrics els dos fenòmens descrits anteriorment succeeixen al mateix temps, és a dir, la deformació i el desplaçament depenen de les tensions mecàniques i del camps elèctric aplicat, de manera que podem obtenir les següents relacions entre carga i deformació de forma matricial:

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (3)$$

$$S = s^E T + d^t E \quad (4)$$

*d = matriu de coeficient deformació piezoelèctrica*

### 4.4.1. Sistema d'eixos.

Degut a que es tracta de materials anisòtrops les seves propietats físiques varien segons la direcció, per tant és necessari definir un sistema d'eixos amb el que poder referir les diferents direccions en que es mesura la propietat a estudiar. En la figura 4 es mostra el sistema d'eixos establert per als piezoelèctrics.

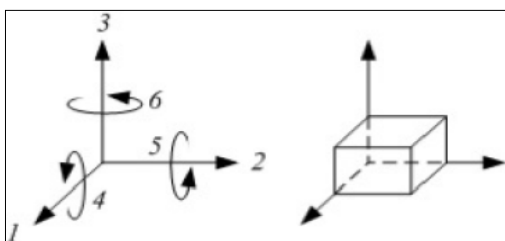


Figura 4: Sistema d'eixos determinat per a materials piezoelèctrics.

Els coeficients piezoelèctrics varien en funció de la direcció, per tant s'han de referenciar als eixos. Es fa de la següent manera:

$$d_{ij} ; g_{ij}$$

Per conveni, el primer subíndex ( $i=1,2,3$ ) de les constants piezoelèctriques es refereix al eix elèctric o de polarització i el segon ( $j=1,2,\dots,6$ ) a l'eix de la tensió mecànica.

## 4.5. Principals Constants piezoelèctriques.

### 4.5.1. Coeficient de deformació piezoelèctrica, $d$ .

Expressa la capacitat del material per deformar-se sota l'acció d'una tensió elèctrica. En l'efecte piezoelèctric directe, representa la densitat de càrrega generada per la força aplicada al material.

### 4.5.2. Coeficient de pressió piezoelèctrica, $g$ .

Expressa la capacitat per generar una tensió elèctrica entre les seves cares quant es sotmès a una deformació elàstica. En l'efecte piezoelèctric directe representa la tensió elèctrica generada per unitat de força i en l'invers la deformació desenvolupada per la densitat de càrrega aplicada ( $\text{m}^2/\text{C}$ ).

### 4.5.3. Factor d'acoblament, $k$ .

Aquest factor ens indica l'eficàcia de la conversió de l'energia en el piezoelèctric, es a dir, la quantitat d'energia elèctrica que es converteix en mecànica. És un factor adimensional mes petit que u. Per l'efecte piezoelèctric directe descriu la quantitat d'energia elèctrica que es converteix en mecànica.

### 4.5.4. Temperatura de Cuire, $T_c$ .

És la temperatura en la qual el material deixa de presentar propietats piezoelèctriques. Quant es passa aquesta temperatura el material perd la polarització romanent a causa de canvis en la seva estructura cristal·lina.

### 4.5.5. Constant de freqüència, $N$ .

Es un factor important ja que permet l'estimació de la freqüència de ressonància del dispositius piezoelèctrics. Els valors típics són de 800 a 3000 Hz·m, para ceràmiques piezoelèctriques de PZT. És una constant important en el disseny de dispositius que funcionen en ressonància.

### 4.5.6. Límit de tensió dinàmic.

És el límit màxim de tensió que el material pot resistir sense trencar-se.

## 4.6. Circuit equivalent d'un Piezoelèctric.

Un cristall piezoelèctric es pot modelitzar com un circuit sèrie RLC amb una capacitat en paral·lel. Els elements  $R$ ,  $L$  i  $C$  són característiques pròpies del material on  $L$  ve determinada per la massa del cristall,  $C$  per la elasticitat mecànica mentre que la  $R$  per la fricció interna piezoelèctric (pèrdues). La capacitat en paral·lel ( $C_1$ ) correspon als elèctrodes i al cablejat.

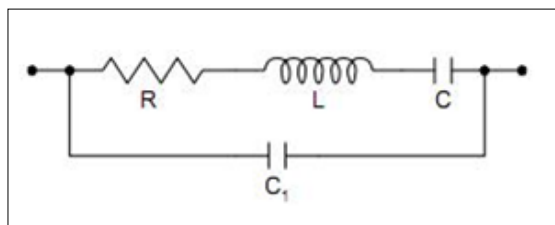


Figura 5: Circuit equivalent.

### 4.6.1. Freqüència de ressonància:

És gràcies a la capacitat  $C_1$  en paral·lel que el cristall presenta dos modes de ressonància, una ressonància sèrie  $f_s$  i una altra en paral·lel  $f_p$ . Aquella freqüència que provoca entrar en ressonància la branca  $R$ ,  $L$  i  $C$  del circuit, és l'anomenada freqüència de ressonància sèrie ( $f_s$ ). En qualsevol circuit ressonant (RLC) l'efecte de treballar a la freqüència de ressonància és que els components reactius s'anul·len i per tant l'impedància total del circuit queda reduïda als elements resistius.

Els cristalls piezoelèctrics tenen una branca RLC, per tant quan es treballa a  $f_s$  la impedància total del circuit és mínima. La freqüència que provoca entrar en ressonància la branca  $C$ ,  $C_1$  i  $L$  del circuit és l'anomenada freqüència de ressonància paral·lel ( $f_p$ ) o altrament dit freqüència d'antiresonància. Al tenir els components reactius en paral·lel la impedància total del sistema es fa infinita si es treballa a aquesta freqüència.

Per tant la màxima impedància del circuit en un cristall piezoelèctric s'obté quan es treballi a la freqüència antiresonant o altrament dit freqüència de ressonància en paral·lel  $f_p$ .

Els efectes descrits anteriorment es poden observar en la següent figura:

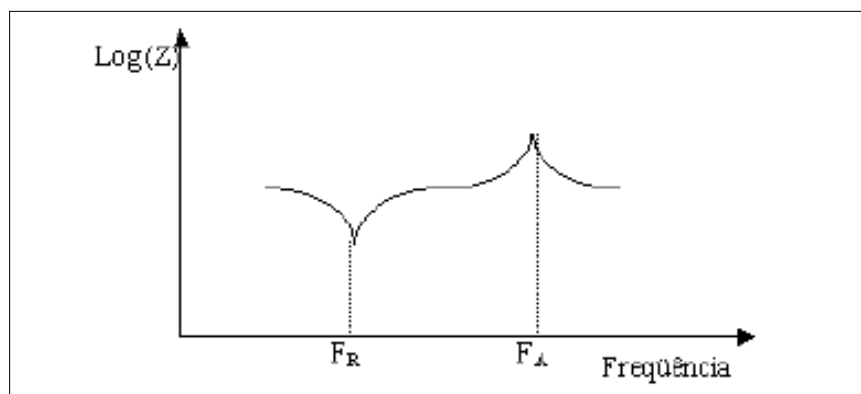
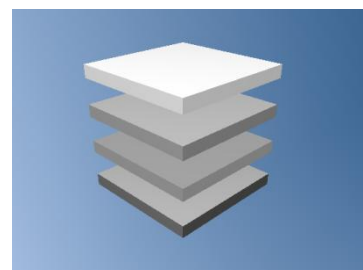


Figura 6: Corba d'impedància respecte la freqüència.

# CAPÍTOL 5: PIEZOELÈCTRICS MULTICAPA.

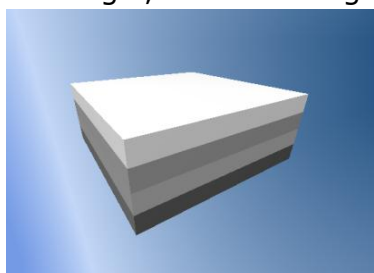
## 5.1. Piezoelèctrics multicapa.

Hi ha una àmplia varietat de productes piezoelèctrics al mercat, les diferències les trobem en la seva geometria, tamany, propietats del material, etc. La combinació d'aquests característiques ens aporta un gran sortit de productes piezoelèctrics els quals poden ser utilitzats en múltiples aplicacions. No obstant una classificació possible per als elements piezoelèctrics, és la que divideix en monocapa o multicapa, en funció dels nombre de làmines de material piezoelèctric que conforma l'element.



*Figura 7: Làmines Piezoelèctriques.*

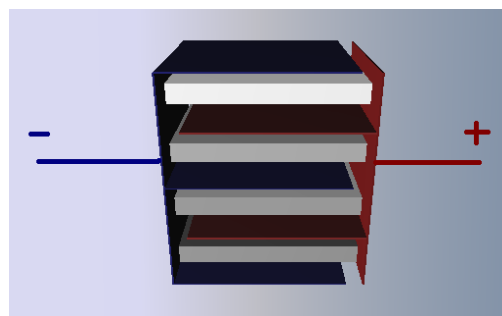
Els piezoelèctrics monocapa són molt limitats per a utilitzar-los com a generadors d'energia, això es degut a que cal treballar a freqüències properes a la de ressonància (de l'orde de Mhz) per treure un rendiment acceptable de les propietats piezoelèctriques. Per altre banda dels monocapes s'obté una baixa tensió de sortida, cosa que els invalida per a certes aplicacions, com ara la d'obtenir energia de l'entorn.



*Figura 8: Piezoelèctric multicapa.*



En els darrers anys s'ha desenvolupat una tecnologia en el camp dels materials piezoelèctrics que ha donat lloc a la fabricació dels piezoelèctrics multicapa. Aquests piezoelèctrics estan formats per diverses làmines piezoelèctriques apilades una sobre l'altra on els elèctrodes es connecten en paral·lel separant la càrrega positiva i negativa. Actualment es construeixen elements piezoelèctrics multicapa de fins a 120 capes.



*Figura 9: Disposició dels elèctrodes.*

Els piezoelèctrics multicapa, presenten la propietat de millorar paràmetres importants com poden ser el coeficient  $d_{33}$  i la seva capacitat  $C$  en funció del nombre de làmines que el componen. L'avantatge principal es troba en l'augment de la capacitat de generació de càrrega per unitat de força aplicada, el coeficient  $d_{33}$  ja que aquest es multiplica per  $n$  vegades on  $n$  és el nombre de capes.

Per altre banda la capacitat interna també es veu modificada amb la configuració multicapa, la qual permet multiplicar la capacitat per  $n^2$  vegades. Aquesta propietat ofereix la possibilitat d'equiparar la capacitat del piezoelèctric amb el condensador d'emmagatzematge augmentat així l'eficiència en la transferència del generador a l'etapa d'emmagatzematge.

## 5.2. El coeficient $d_{33}$ en els piezoelèctrics multicapa.

Ja s'ha comentat en aquest projecte que un dels coeficients més importants dels materials piezoelèctrics utilitzats com a generadors és l'anomenat coeficient  $d_{33}$ , aquest relaciona càrrega amb força i és determinant per a les aplicacions de Energy Harvesting ja que ens indica de forma aproximada quina és la capacitat del material piezoelèctric per a recol·lectar energia.

Els valors d'aquest coeficient en materials piezoelèctrics monocapa normalment estan entre 300 i 500 pC/N. No obstant per als materials piezoelèctrics multicapa, aquest coeficient augmenta considerablement, ja que el valor total del coeficient  $d_{33}$  és el resultat del producte entre el nombre de capes i el propi coeficient del material piezoelèctric.

$$d_{33\text{multicapa}} = n \cdot d_{33} \quad (5)$$

$d_{33}$  = coeficient del material piezoelectric.  
 $n$  = nombre de capes.

Per tant amb aquest tipus de materials augmenta de forma important la càrrega elèctrica generada per unitat de força aplicada. Cal tenir en compte que actualment el nombre de capes que conformen un piezoelèctric multicapa pot arribar fins a 120 capes, per tant la millora és significativa.

### 5.3. La capacitat en els piezoelèctric multicapa.

La facultat d'un cos per a emmagatzemar càrrega elèctrica s'anomena capacitat i l'expressió clàssica que defineix aquest fenomen és:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d} \quad (6)$$

$\varepsilon_0$  = Constat dielèctric del buit.

$\varepsilon_r$  = Constant dielèctrica relativa (específica de cada material).

$d$  = Distància entre plaques del condensador.

$A$  = Area d'una placa .

Aquesta expressió també és vàlida per a determinar la capacitat d'un piezoelèctric, cal tenir en compte que en aquest cas particular en comptes de tenir distància entre plaques ( $d$ ), tenim gruix de capa del material piezoelèctric.

$$C_{piezo} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{Gruix} \quad (7)$$

Així doncs, amb aquesta expressió podem determinar la capacitat d'un piezoelèctric monocapa, però si adaptem aquesta expressió per tal de que sigui vàlida per als piezoelèctrics multicapa l'expressió seria la següent:

$$C_{piezo} = n \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{Gruix/n} \rightarrow C_{piezo} = n^2 \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{Gruix} \quad (8)$$

$n$  = número de capes.

Per tant podem observar que en els piezoelèctrics multicapa hi ha una relació quadràtica entre la capacitat i el nombre de capes que conformen el piezoelèctric. Aquest fet implica que amb piezoelèctrics multicapa la capacitat augmenta de forma considerable, aspecte útil si com en el nostre cas, es busca transferir aquesta energia a un condensador d'emmagatzematge.

# **CAPÍTOL 6:**

# **ASSOCIACIÓ DE**

# **PIEZOELÈCTRICS.**

## **6.1. Introducció.**

Un condensador és un component elèctric passiu el qual està compost per dues plaques conductores separades per un material dielèctric. Aquesta disposició permet l'emmagatzematge d'una certa càrrega elèctrica entre les dues plaques conductores del condensador, la qual s'expressa com:

$$q = V \cdot C \quad (9)$$

*q: càrrega emmagatzemada.*

*v: tensió en borns del condensador.*

*C: capacitat del condensador.*

Existeixen dues formes bàsiques d'associar condensadors, cadascuna de les quals es pot expressar com un sistema equivalent. Aquestes són:

- Associació de condensadors en sèrie.
- Associació de condensadors en paral·lel.

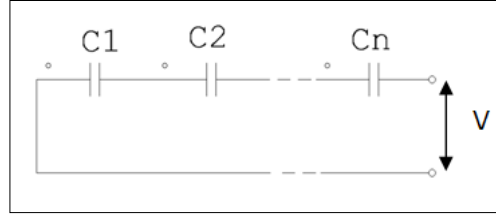
**Associació en sèrie.**

Figura 10: Associació sèrie.

En aquesta situació, tenim que:

$$q_1 = q_2 = \dots = q_n = q \quad (10)$$

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (11)$$

$$V = v_1 + v_2 + v_3 \quad (12)$$

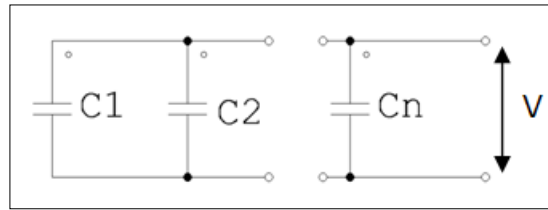
**Associació en paral·lel.**

Figura 11: Associació paral·lel.

En aquesta situació, tenim que:

$$Q_{eq} = q_1 + q_2 + \dots + q_n \quad (13)$$

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (14)$$

$$v_1 = v_2 = v_3 = V \quad (15)$$

## 6.2. Modelització d'un element piezoelèctric.

De manera simplificada, podem modelar un element piezoelèctric com un condensador amb una certa càrrega. El valor d'aquesta càrrega vindrà determinat per la força que estigui rebent el piezoelèctric en un instant determinat de temps, mentre que la capacitat del piezoelèctric modelitzat com a condensador, és funció del material que compona el propi piezoelèctric i dels seus paràmetres constructius.

Així doncs, suposant l'acceptació d'aquesta simplificació, es compliran les següents expressions.

$$V = \frac{q}{C} \quad (15)$$

$$q = F \cdot d_{33} \quad (16)$$

$$C = \varepsilon \frac{A}{g} \quad (17)$$

$F$ : força aplicada.

$d_{33}$ : coeficient propi del material.

$\varepsilon$ : permeabilitat elèctrica.

$A$ : superfície dels elèctrodes del piezo.

$g$ : gruix del piezo.

## 6.3. Associació d'elements piezoelèctrics.

Tenint en compte les explicacions realitzades en els apartats anteriors, els elements piezoelèctric, de la mateixa manera que els condensadors, es poden associar en sèrie i en paral·lel. En els apartat següents s'estudien les propietats i característiques pròpies de cadascuna d'aquestes dues associacions possibles.

### 6.3.1. Associació en sèrie.

Quan associem elements piezoelèctrics en sèrie, obtenim un esquema com el que es pot trobar en la *figura 10*. Tenint en compte això, les equacions del sistema serien:

$$q_1 = q_2 = \dots = q_n = F \cdot d_{33} \quad (18)$$

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (19)$$

$$V = v_1 + v_2 + v_3 = F \cdot d_{33} \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \right) \quad (20)$$

Si suposem que tots els elements piezoelèctrics associats són iguals, fet lògic en una aplicació real, tenim que:

$$q_1 = q_2 = \dots = q_n = F \cdot d_{33} C_1 = C_2 = \dots = C_n \rightarrow C_{eq} = \frac{C}{n} \quad (21)$$

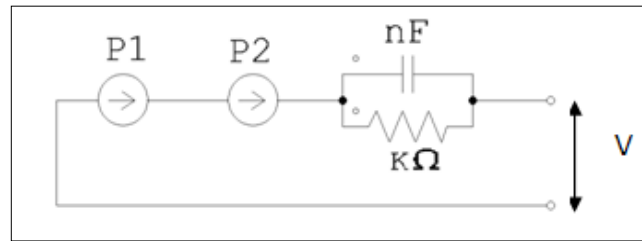
$$V = \frac{q_{eq}}{C_{eq}} \rightarrow V = \frac{F \cdot d_{33}}{\frac{C}{n}} \rightarrow V = n \cdot F \cdot d_{33} \left( \frac{1}{C} \right) \quad (22)$$

Associant els elements piezoelèctrics en aquesta disposició, veiem que s'aconsegueix augmentar la tensió de sortida del sistema. Per contra però, disminueix la seva capacitat i aquest fet suposa un inconvenient important en el camp de l'*energy harvesting*, ja que empitjorarà la eficiència en la transferència

d'energia de l'etapa de generació a l'etapa d'emmagatzematge fins a nivells en que la major part de l'energia generada serà desaprofitada en aquest procés. (Veure apartat 7.1 apartat on s'explica la corba de transferència).

L'associació en sèrie d'elements piezoelèctrics emprats com a generadors, presenta un altre inconvenient important. Cal tenir present que per a que les expressions desenvolupades anteriorment es compleixin, cal suposar que tots els elements piezoelèctrics estan generant energia de forma simultània i, aquesta situació, és difícilment assolible en un cas real. Si això no passa, els elements piezoelèctrics que no estan produint energia, passen de ser elements generadors a ser elements consumidors d'energia, els quals consumiran part de la càrrega generada pels piezoelèctrics que estiguin generant.

En la *figura 12* es pot veure una situació en la que hi ha tres piezoelèctrics connectats en sèrie. Dos d'ells, modelats com a fonts de càrrega, estan generant energia, mentre que el tercer, modelat com una resistència i una capacitat en paral·lel, representa un piezoelèctric que no està generant.



*Figura 12: Piezoelèctrics connectats en sèrie.*

Degut a l'alta resistència interna d'un piezoelèctric en estat de repòs (habitualment de l'ordre de  $k\Omega$ ), la caiguda de tensió que aquest provocaria seria considerablement elevada i convertiria en pràcticament nul·la la tensió de sortida.

### 6.3.2. Associació en paral·lel.

Quan associem elements piezoelèctrics en paral·lel, obtenim un esquema com el que es pot trobar en la *figura 11*. Tenint en compte això, les equacions del sistema serien:

$$Q_{eq} = q_1 + q_2 + \dots + q_n = n \cdot F \cdot d_{33} \quad (23)$$

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (24)$$

$$v_1 = v_2 = \dots = v_n = V \quad (25)$$

$$V = \frac{q_{eq}}{C_{eq}} = \frac{n \cdot F \cdot d_{33}}{C_1 + C_2 + \dots + C_n} \quad (26)$$

Si suposem que tots els elements piezoelèctrics associats són iguals, fet lògic en una aplicació real, tenim que:

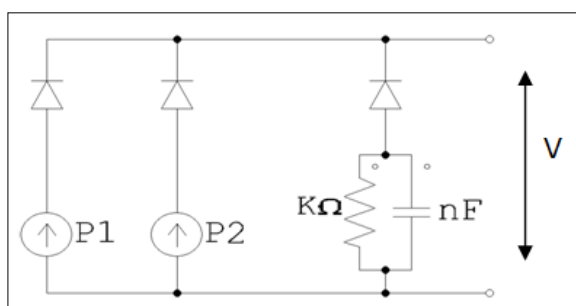
$$C_1 = C_2 = \dots = C_n = C \rightarrow C_{eq} = n \cdot C \quad (27)$$

$$V = \frac{q_{eq}}{C_{eq}} \rightarrow V = \frac{n \cdot F \cdot d_{33}}{n \cdot C} \rightarrow V = F \cdot d_{33} \left( \frac{1}{C} \right) \quad (28)$$

Associant els elements piezoelèctrics en aquesta disposició, veiem que la capacitat equivalent del sistema es multiplica per  $n$ , la qual cosa es positiva a l'hora de millorar l'eficiència en la transferència energètica de l'etapa de generació a l'etapa d'emmagatzematge.

En quant a la tensió de sortida, el valor obtingut no depèn del nombre de piezoelèctrics connectats, tal com succeeix en l'associació en sèrie. Aquest fet porta a l'obtenció de valors més reduïts de tensió en comparació amb l'agrupació en sèrie. Tot i això, associar els elements piezoelèctrics en paral·lel fa desaparèixer els problemes que presenta l'associació en sèrie a causa de la no simultaneïtat de la generació i per tant permet aprofitar una major quantitat de l'energia generada.

En la *figura 13* es pot veure una situació en la que hi ha tres piezoelèctrics connectats en paral·lel. Dos d'ells, modelats com a fonts de càrrega, estan generant energia, mentre que el tercer, modelat com una resistència i una capacitat en paral·lel, representa un piezoelèctric que no està generant. Mitjançant la utilització d'un element passiu com és el díode, es pot evitar que els piezoelèctrics que no estan generant absorbeixin energia dels que sí que ho estan fent.



*Figura 13: Piezoelèctrics connectats en paral·lel.*

Suposant que la força aplicada als diferents piezoelèctrics és suficient per generar tensions superiors a la tensió llindar dels díodes, l'energia generada pels dos elements piezoelèctrics que produeixen energia, serà transferida al sistema d'emmagatzematge, mentre que el consum del piezoelèctric que es troba en estat de repòs serà nul.

### *6.3.3. Associació mixta.*

Pot existir el cas, de que en una aplicació determinada la generació simultània estigui garantida. En casos així, es podria valorar la combinació d'associacions en sèrie i en paral·lel dels elements piezoelèctrics. Amb una configuració d'aquest tipus, es podrien ajustar de forma més acurada la tensió de sortida desitjada i la capacitat equivalent del sistema de generació fins arribar a una solució de compromís entre ambdós paràmetres la qual permeti treure el màxim profit de l'aplicació en funció del consum que es necessiti alimentar.

**Proposta1.**

Un possible esquema d'associació mixta de piezoelèctrics, seria el proposat en la figura 14.

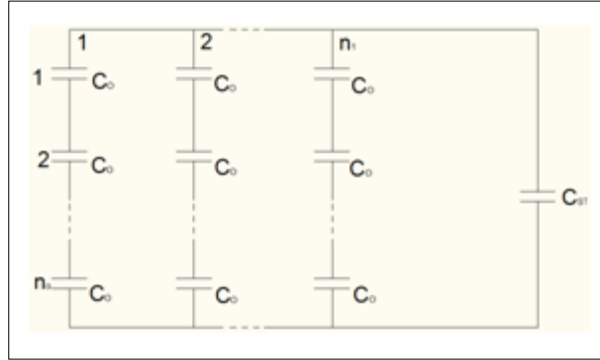


FIGURA 14: Esquema d'associació mixta.  
Proposta 1

En el circuit de la figura trobem  $n_1$  branques paral·leles d' $n_0$  condensadors en sèrie, la capacitat dels quals és  $C_0$ . Cadascun d'aquests condensadors modela un piezoelèctric. Cal tenir present que aquest apartat es desenvolupa sobre el supòsit de que tots els piezoelèctrics estan apilats i que, en conseqüència, quan sigui aplicada una força  $F$ , aquesta afectarà per igual i de forma simultània tots els elements piezoelèctrics.

Així doncs, si estudiem una de les branques de forma independent, tenim que:

$$C_{eq0} = \frac{C_0}{n_0} \quad (29)$$

I quan una força  $F$  sigui aplicada en la direcció 3:

$$V_{out} = \frac{n_0 \cdot F \cdot d_{33}}{C_0} \quad (30)$$

Si ara considerem  $n_1$  branques en paral·lel tenim que la tensió de sortida del sistema continuarà essent la determinada en l'expressió 30, mentre que la capacitat del sistema serà:

$$C_{eq1} = \frac{n_1}{n_0} \cdot C_0 \quad (31)$$

Amb aquesta configuració, veiem com la tensió de sortida depèn d' $n_0$ , mentre que la capacitat equivalent del sistema és funció de la relació entre  $n_1$  i  $n_0$ .

Des del punt de vista energètic, l'energia generada pel sistema serà:

$$E = \frac{1}{2} \cdot \frac{n_1}{n_0} \cdot C_0 \cdot \left( \frac{n_0 \cdot F \cdot d_{33}}{C_0} \right)^2 = \frac{n_1 \cdot n_0 \cdot F^2 \cdot d_{33}^2}{2 \cdot C_0} \quad (32)$$



A l'introduir en el sistema el condensador d'emmagatzematge  $C_{st}$ , tenim que la tensió de sortida del sistema disminuirà en funció de la capacitat d'aquest condensador.

$$V_{out} = \frac{Q_t}{C_{eq}} = \frac{n_1 \cdot F \cdot d_{33}}{\frac{n_1}{n_0} \cdot C_0 + C_{st}} \quad (33)$$

L'energia emmagatzemada en el condensador  $C_{st}$ , la qual correspon a l'energia útil per a ser utilitzada, serà:

$$E_{st} = \frac{1}{2} \cdot C_{st} \cdot \left( \frac{n_1 \cdot F \cdot d_{33}}{\frac{n_1}{n_0} C_0 + C_{st}} \right)^2 \quad (34)$$

Tenint en compte que, tal com es demostra en l'apartat 7.1 (corba de transferència), des del punt de vista de la transferència d'energia és desitjable que la capacitat del condensador d'emmagatzematge correspongui amb la capacitat equivalent del sistema de generació, és lògic pensar que caldrà avançar cap a un sistema de generació la capacitat equivalent del qual s'ajusti a les necessitats de la capacitat del condensador d'emmagatzematge que es necessiti. En el cas que ambdues capacitats coincideixin, la transferència d'energia cap al condensador serà màxima i, en aquesta situació:

$$V_{out} = \frac{n_1 \cdot F \cdot d_{33}}{\frac{n_1}{n_0} \cdot C_0 + \frac{n_1}{n_0} C_0} = \frac{n_0 \cdot F \cdot d_{33}}{2 \cdot C_0} \quad (35)$$

L'energia emmagatzemada en el condensador  $C_{st}$  correspondrà a un 25% de l'energia generada pel sistema:

$$E_{st} = 0,25 \cdot \frac{n_1 \cdot n_0 \cdot F^2 \cdot d_{33}^2}{2 \cdot C_0} = \frac{n_1 \cdot n_0 \cdot F^2 \cdot d_{33}^2}{8 \cdot C_0} \quad (36)$$

### **Proposta2.**

Una segona possibilitat d'associació mixta de piezoelèctrics, és la proposada en la figura 15.

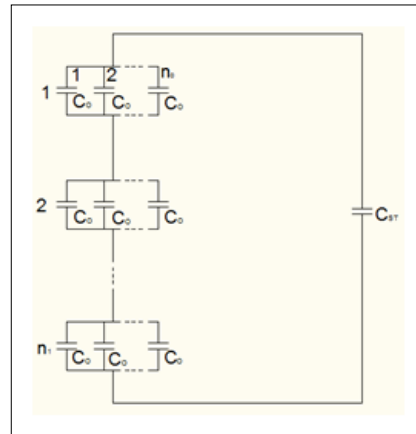


FIGURA 15: Esquema d'associació mixta. Proposta 2.

En el circuit de la figura 15, menyspreant el díode, trobem  $n_1$  agrupacions en sèrie d' $n_0$  condensador en paral·lel, la capacitat dels quals és  $C_0$ . Cadascun d'aquests condensadors modela un piezoelèctric. Cal tenir present que aquest apartat es desenvolupa sobre el supòsit de que tots els piezoelèctrics estan apilats i que, en conseqüència, quan sigui aplicada una força  $F$ , aquesta afectarà per igual i de forma simultània tots els elements piezoelèctrics.

Així doncs, si estudiem una de les agrupacions d' $n_0$  piezoelèctrics en paral·lel de forma independent, tenim que:

$$C_{eq0} = n_0 \cdot C_0 \quad (37)$$

I quan una força  $F$  sigui aplicada en la direcció 3:

$$V_{out} = \frac{F \cdot d_{33}}{C_0} \quad (38)$$

Si ara considerem  $n_1$  agrupacions com l'anterior, connectades en sèrie entre elles, tenim que la tensió de sortida del sistema serà:

$$V_{out} = n_1 \cdot \frac{F \cdot d_{33}}{C_0} \quad (39)$$

I la capacitat equivalent:

$$C_{eq1} = \frac{n_0}{n_1} \cdot C_0 \quad (40)$$

Amb aquesta configuració, veiem com la tensió de sortida depèn d' $n_1$ , mentre que la capacitat equivalent del sistema és funció de la relació entre  $n_0$  i  $n_1$ .

Des del punt de vista energètic, l'energia generada pel sistema serà:

$$E = \frac{1}{2} \cdot \frac{n_0}{n_1} \cdot C_0 \cdot \left( \frac{n_1 \cdot F \cdot d_{33}}{C_0} \right)^2 = \frac{n_1 \cdot n_0 \cdot F^2 \cdot d_{33}^2}{2 \cdot C_0} \quad (41)$$

A l'introduir en el sistema el condensador d'emmagatzematge  $C_{st}$ , tenim que la tensió de sortida del sistema disminuirà en funció de la capacitat d'aquest condensador.

$$V_{out} = \frac{Q_t}{C_{eq}} = \frac{n_0 \cdot F \cdot d_{33}}{\frac{n_0}{n_1} \cdot C_0 + C_{st}} \quad (42)$$

L'energia emmagatzemada en el condensador  $C_{st}$ , la qual correspon a l'energia útil per a ser utilitzada, serà:

$$E_{st} = \frac{1}{2} \cdot C_{st} \cdot \left( \frac{n_0 \cdot F \cdot d_{33}}{\frac{n_0}{n_1} C_0 + C_{st}} \right)^2 \quad (43)$$

Tenint en compte que, tal com es demostra en l'apartat 7.1 (corba de transferència), des del punt de vista de la transferència d'energia és desitjable que la capacitat del condensador d'emmagatzematge correspongui amb la capacitat equivalent del sistema de generació, és lògic pensar que caldrà avançar cap a un sistema de generació la capacitat equivalent del qual s'ajusti a les necessitats de la capacitat del condensador d'emmagatzematge que es necessiti. En el cas que ambdues capacitats coincideixin, la transferència d'energia cap al condensador serà màxima i, en aquesta situació:

$$V_{out} = \frac{n_0 \cdot F \cdot d_{33}}{\frac{n_0}{n_1} \cdot C_0 + \frac{n_0}{n_1} C_0} = \frac{n_1 \cdot F \cdot d_{33}}{2 \cdot C_0} \quad (44)$$

L'energia emmagatzemada en el condensador  $C_{st}$  correspondrà a un 25% de l'energia generada pel sistema:

$$E_{st} = 0,25 \cdot \frac{n_1 \cdot n_0 \cdot F^2 \cdot d_{33}^2}{2 \cdot C_0} = \frac{n_1 \cdot n_0 \cdot F^2 \cdot d_{33}^2}{8 \cdot C_0} \quad (45)$$

### Comparació de les dues propostes.

Taula 1: Comparació de les dues propostes.

PROPOSTA	$C_{eq1}$	$V_{out} (C_{eq1}=C_{st})$	$E_{st} (C_{eq1}=C_{st})$
1	$\frac{n_1}{n_0} \cdot C_0$	$\frac{n_0 \cdot F \cdot d_{33}}{2 \cdot C_0}$	$\frac{n_1 \cdot n_0 \cdot F^2 \cdot d_{33}^2}{8 \cdot C_0}$
2	$\frac{n_0}{n_1} \cdot C_0$	$\frac{n_1 \cdot F \cdot d_{33}}{2 \cdot C_0}$	$\frac{n_1 \cdot n_0 \cdot F^2 \cdot d_{33}^2}{8 \cdot C_0}$

Observant les expressions que s'han deduït, veiem que a nivell de tensió de sortida, en els dos casos aquest valor depèn exclusivament del nombre connexions en sèrie.

Pel que fa a la capacitat equivalent del sistema de generació, es pot observar que és la mateixa si es manté el nombre de connexions en sèrie i en paral·lel en ambdós casos.

Des del punt de vista energètic, veiem que l'expressió que s'ha deduït és la mateixa, tenint en compte que  $n_1$  i  $n_0$  tenen un significat diferent en cadascuna de les dues propostes.

Així doncs, podem dir que els dos sistemes equivalents quan:

$$n_0 (\text{proposta 1}) = n_1 (\text{proposta 2})$$

$$n_1 (\text{proposta 1}) = n_0 (\text{proposta 2})$$

Dit d'una altra manera, les dues propostes són equivalents si es guarda la relació entre el nombre de piezoelèctrics connectats en sèrie i en paral·lel.

Cal afegir que, independentment de la proposta d'associació de piezofilms que es decideixi utilitzar, les valors dels paràmetres  $n_0$  i  $n_1$  dependrà de les necessitats del sistema que es pretengui alimentar i passarà sempre per adoptar una solució de compromís entre la tensió de sortida i la capacitat equivalent del sistema.

## 6.4. Conclusions.

- L'associació de generadors piezoelèctrics en sèrie presenta un seguit d'inconvenients que la fan pitjor davant l'associació en paral·lel. Aquest fet s'ha constatat analíticament en els apartats anteriors, on s'ha pogut veure que associant piezoelèctrics en sèrie, la major part de l'energia generada es perd en la pròpia etapa de generació o en la transferència d'aquesta energia a l'etapa d'emmagatzematge. De la mateixa manera, aquest fet també s'ha constatat de forma experimental en alguns assajos de projectes de fi de carrera als quals hem tingut accés.
- Les associacions en sèrie i en paral·lel presenten avantatges i inconvenients propis; les propietats que ofereix l'associació de generadors piezoelèctrics en paral·lel (augment de la capacitat i poder associar generadors sense pèrdua d'energia per absorció) fan que aquesta sigui la més òptima de les dues per tal de poder aprofitar l'energia que els generadors piezoelèctrics produeixen.
- La direcció que segueix el desenvolupament en el camp dels piezoelèctrics recolza les conclusions anteriors. La tendència que es segueix és la d'associar els piezoelèctrics en paral·lel, tal com es fa, per exemple, en la construcció d'un actuador multicapa.
- L'associació mixta de piezoelèctrics permet aprofitar alhora els avantatges de la connexió en sèrie i en paral·lel. D'aquesta manera, la disminució de la capacitat equivalent que comporta l'associació en sèrie, es contrarestada per l'augment de la capacitat que suposa la connexió en paral·lel. D'altra banda, la impossibilitat d'elevat el voltatge associant els piezoelèctrics en paral·lel, es contrarestada per l'associació en sèrie, la qual sí que ofereix aquesta possibilitat. D'aquesta manera, es pot arribar a uns valors de tensió de sortida i de capacitat equivalent del sistema que optimitzin aquest en funció del consum a alimentar. Cal dir però, que en alguns casos, la solució òptima requerirà l'associació d'un elevat nombre d'elements piezoelèctrics.

# CAPÍTOL 7: CIRCUIT DE CONDICIONAMENT.

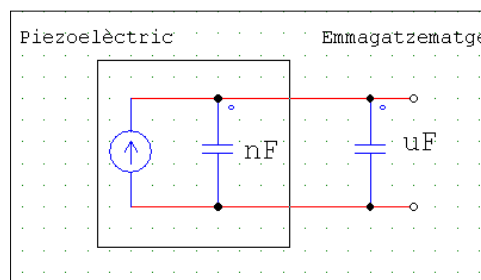
Un element piezoelèctric que s'utilitza com a generador transforma l'energia que rep en forma de pressió a les seves cares, en càrrega elèctrica. Aquesta energia que s'obté no presenta les condicions necessàries per a poder ser utilitzada en dispositius que requereixin d'energia elèctrica per a ser alimentats, ja que el que s'obté a la sortida del generador és un senyal variable en funció de la pressió aplicada en el piezoelèctric el qual pot prendre valors positius o negatius en funció de la direcció d'aquesta pressió. Per aquest motiu doncs, es fa necessària la utilització d'una etapa de condicionament del senyal per tal de donar-li un nivell de tensió i una forma d'ona òptims per a abastir el consum d'un determinat dispositiu.

Abans de comentar els diferents circuits que podem utilitzar per adaptar el senyal, cal definir alguns conceptes determinants per a l'elecció del circuit de condicionament, els quals s'expliquen en els següents apartats.

## 7.1. Concepte de capacitat interna i condensador d'emmagatzematge.

El principi de funcionament bàsic per a poder utilitzar la càrrega elèctrica generada pel piezoelèctric és emmagatzemar aquesta energia en un condensador.

Un piezoelèctric es pot modelitzar com un generador de càrrega el qual té associada en paral·lel una capacitat, aquesta és una capacitat interna i inherent al piezoelèctric. El valor habitual d'aquest paràmetre en piezoelèctrics monocapa és de l'ordre de nanofarads (nF).



*Figura 16: Esquema de capacitats.*

D'altra banda per a disposar d'una quantitat d'energia útil, per abastir sistemes de consum reduït l'ordre de magnitud dels condensadors d'emmagatzematge ha de ser de microfarads ( $\mu\text{f}$ ). Aquesta diferència d'ordres de magnitud entre la capacitat del piezoelèctric i la del condensador d'emmagatzematge provoca pèrdues en la transferència d'energia; aquesta s'optimitza quan els valors de les dues capacitats són molt similars.

En el següent gràfic es veu representada la corba d'eficiència de transferència d'energia entre un piezoelèctric i un condensador. En l'eix d'ordenades s'hi troba la relació entre l'energia disponible en el condensador d'emmagatzematge i l'energia generada pel piezoelèctric en tant per cent, mentre que en l'eix d'abscisses la raó entre la capacitat del material piezoelèctric i el condensador d'emmagatzematge.

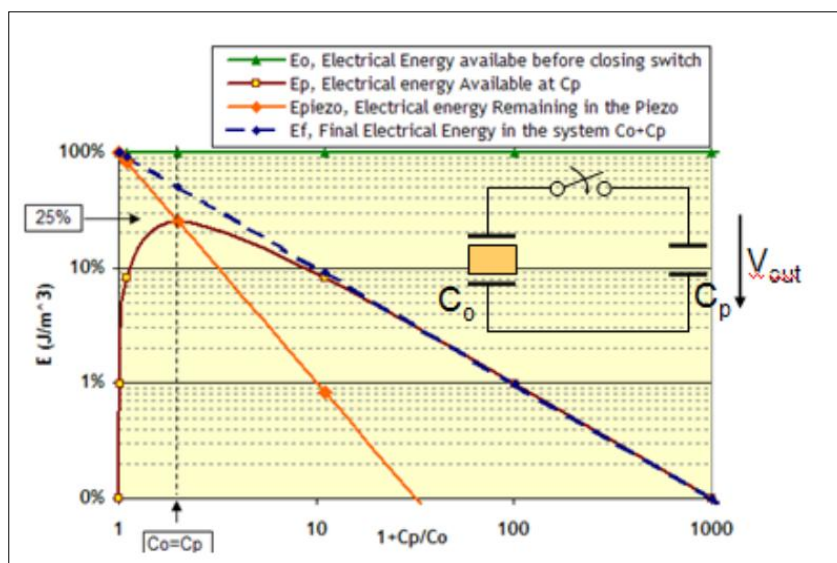


Figura 17: Corba de transferència entre dos condensadors.

Es pot apreciar com el punt on hi ha una màxima transferència d'energia és quan les dues capacitats són iguals. Per tant a l'hora de dissenyar el circuit de condicionament tindrem en compte aquest fet.

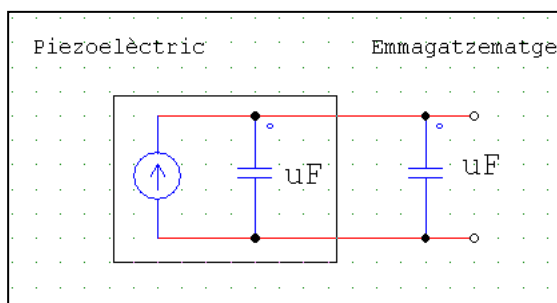


Figura 18: Esquema de capacitats ideal.

## 7.2. La transferència d'energia pas per pas.

### **Primer: Generació de càrrega del material piezoelèctric:**

Quan s'aplica una força, el material piezoelèctric genera càrrega elèctrica a les seves cares..

$$Q_p = F \cdot d_{33} \quad (46)$$

$Q_p$ : càrrega generada pel piezoelèctric.

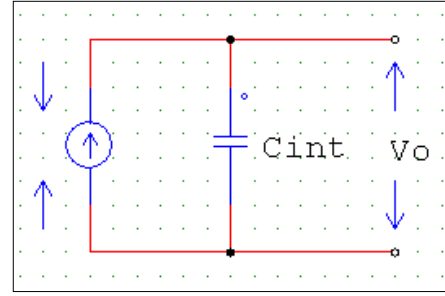


Figura 19: Generació de càrrega.

Entenent que aquest material es pot modelitzar com un generador de càrrega el qual té associat un condensador, es pot determinar la tensió en els seus borns.

$$Q_p = C_{int} \cdot V_o \rightarrow V_o = \frac{F \cdot d_{33}}{C_{int}} \quad (47)$$

$C_{int}$  = Capacitat interna del material.

Per tant l'energia inicial d'aquest sistema es pot expressar amb la següent expressió:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C_{int} \cdot V_o^2 \quad (48)$$

### **Segon: Associació d'un condensador d'emmagatzematge.**

En el sistema anterior se l'hi associa en paral·lel un condensador d'emmagatzematge, per tant aquest  $C_{st}$  acumularà part de la càrrega que hi ha en el  $C_{int}$ , fins que les tensions en els extrems sigui igual.

$$V_{out} = V_{C_{int}} = V_{C_{st}} \quad (49)$$

Per tant  $V_{out}$ :

$$V_{out} = \frac{Q_p}{C_{int} + C_{st}} = \frac{C_{int} \cdot V_o}{C_{int} + C_{st}} \quad (50)$$

$C_{st}$  = condensador emmagatzematge

Per tal que l'eficiència en la transferència d'energia sigui màxima,  $C_{int}$  i  $C_{st}$  han de ser iguals,

$$C_{int} = C_{st} = C \quad (51)$$

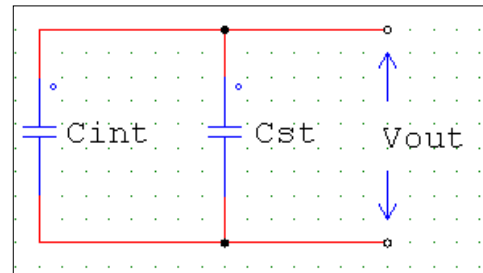


Figura 20: Associació del condensador d'emmagatzematge.

L'energia final pel condensador d'emmagatzematge serà:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{out}^2 \quad (52)$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \left( \frac{C \cdot V_o}{2C} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \frac{C^2 \cdot V_o^2}{4C^2} \quad (53)$$

$$E = \frac{1}{8} C \cdot V_o^2 \quad (54)$$

Si es compara l'energia inicial i la final es pot observar com:

$$E_{final} = 0,25 E_{inicial} \quad (55)$$

## 7.3. Circuits de condicionament

D'acord amb el que em vist en l'apartat anterior, és necessari associar amb el generador piezoelèctric una etapa de condicionament. En funció dels components que integrin la etapa, podrem classificar aquesta en activa o passiva. En els següents apartats es donen a conèixer possibles circuits els quals podrien complir amb la funció de condicionament del senyal desitjada.

### 7.3.1. Circuits passius.

- Tenen l'avantatge de no necessitar alimentació auxiliar.
- Es necessita un nivell de tensió mínim per funcionar degut a la tensió llindar dels díodes.
- Seria útil per a aplicacions en que es disposi de suficient diferència de potencial per vèncer la tensió llindar dels elements passius que integren el circuit.
- El fet de no necessitar alimentació auxiliar converteix l'aplicació que utilitzi aquest tipus de circuits en una aplicació completament autònoma.

#### **Rectificador de mitja ona.**

És el circuit passiu més simple. Els seus components elementals són un díode i un condensador. El condensador és l'encarregat d'emmagatzemar l'energia que proporioni el generador piezoelèctric i el díode té la missió d'impedir que el condensador es descarregui sobre el piezoelèctric en els moments que no hi ha generació.

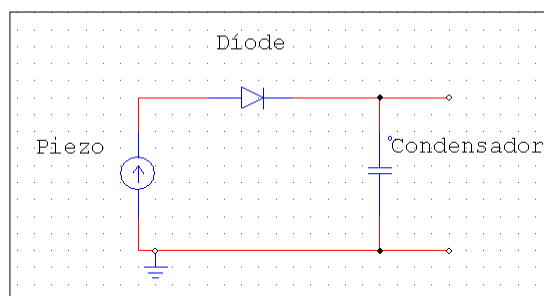


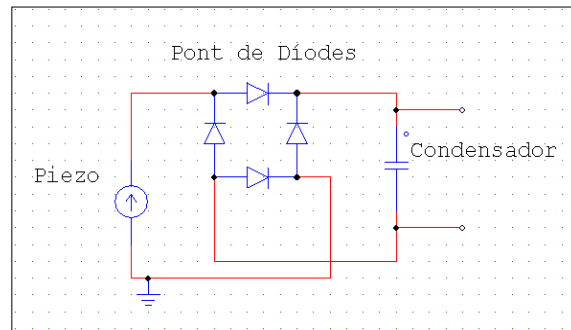
Figura 21: Rectificador de mitja ona.



Amb aquest circuit només s'aprofita l'energia generada en una polaritat, per tant no serà útil si el piezoelèctric està sotmès a forces tals que generi tensió en les dues polaritats.

### **Rectificador d'ona completa (pont de díodes).**

Utilitza un total de quatre díodes i un condensador. Els quatre díodes permeten que el condensador pugui emmagatzemar l'energia generada independentment del seu signe. Al mateix temps impedeixen que el condensador es descarregui sobre el piezoelèctric en moments que no hi ha generació.



*Figura 22: Pont de díodes.*

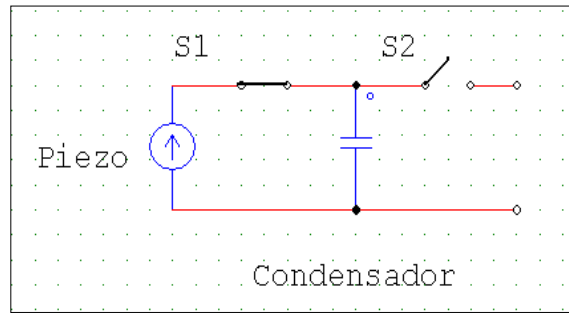
### **7.3.2. Circuits actius.**

- Aquests circuits requereixen que el sistema tingui una alimentació auxiliar per a poder funcionar. Aquest fet suposa una forta limitació.
- Aquests tipus de circuits presenten l'avantatge de permetre que el sistema treballi amb tensions baixes.
- La utilització d'aquest tipus de circuits va més encarada a la sensòrica, on el senyal generat no està destinat a alimentar cap consum sinó a transmetre informació, fent us d'etapes de condicionament si s'escau.

Que l'energia necessària per alimentar el circuit sigui superior a l'energia generada és la principal problemàtica que presenta integrar circuits actius en condicions on l'energia generada és molt baixa. Aquesta situació és totalment plausible i per tant si es dona el sistema és deficitari.

### **Switched Capacitor.**

Integra un condensador que té la funció d'emmagatzemar l'energia generada per l'element piezoelèctric i transferir-la al dispositiu que es necessita alimentar. El funcionament del circuit ve marcat per dos interruptors controlats que determinen si el condensador es troba en estat de recollida d'energia o si pel contrari aquest ja ha emmagatzemat energia suficient per poder transferir-la al consum.



*Figura 23: Switched capacitor.*

La situació de cada interruptor vindrà donada pel nivell de tensió present en el condensador, de manera que mentre aquest sigui inferior a la tensió de commutació, el condensador restarà connectat amb el generador, captant l'energia que aquest produeixi. Quan el condensador hagi arribat a un cert nivell de tensió, es produirà la commutació de manera que aquest es descarregarà sobre el consum que té associat.

# **Bloc II: Desenvolupament d'aplicacions.**

# **CAPÍTOL 8:**

# **INTRODUCCIÓ AL**

# **BLOC II.**

Tot seguit es presenta el segon bloc del projecte; en aquest, es plantegen i es desenvolupen diverses possibles aplicacions que hem ideat per tal de recol·lectar energia de l'entorn mitjançant piezoelèctrics. Aquest segon bloc, representa un gruix important del projecte, ja que a part del plantejament inicial de les diferents opcions també avarca tot l'estudi efectuat per a les diferents aplicacions.

Aquest Bloc II suposa el salt de la teoria a la pràctica i per aquest motiu és el que ha estat més difícil de realitzar, ja que hem hagut de resoldre els diversos dubtes, problemes i dificultats que han anat sorgint aplicant el nostre criteri a l'hora de triar una solució. Aquest fet, és inevitable quan, com en el nostre cas, no existeix un camí a seguir ben definit, degut a que el món de la piezoelectricitat es troba en plena fase de desenvolupament i no existeix una línia única a seguir ni una manera determinada de fer les coses.

No obstant ha estat una fase força interessant, el sector tecnològic normalment està enmarcat dins l'àmbit normatiu i per tant es poc flexible, tot i això aquesta fase ens ha obligat a ser creatius i resoldre els problemes que constantment ens trobàvem.

# **CAPÍTOL 9:**

## **PLANTEJAMENT I**

### **SELECCIÓ**

### **D'HIPÒTESIS.**

Aquest capítol conté el punt de trobada entre la teoria sobre materials piezoelèctrics i la seva utilitat pràctica en el camp de l'aprofitament d'energia. A continuació, es presenten les diverses solucions per a la recollida d'energia mitjançant materials piezoelèctrics que es van plantejar i de les quals se'n van seleccionar tres per a desenvolupar en el present projecte.

Les aplicacions plantejades estan classificades en *macrogeneració* i *microgeneració*, amb aquesta diferenciació s'ha pretès posar de manifest l'abast de cadascuna de les aplicacions. Així doncs, entenem per macrogeneració l'aprofitament de grans quantitats d'energia, tenint en compte les limitacions dels materials piezoelèctrics en aquest camp. D'altra banda, el terme microgeneració fa referència a aplicacions on les quantitats d'energia generada són baixes i aquesta energia es destina a l'alimentació de dispositius de consum reduït, normalment amb l'objectiu d'allargar l'autonomia de les seves bateries.

## 9.1. Macrogeneració.

### *9.1.1. Obtenció d'energia a partir del caminar de les persones.*

Consistiria en instal·lar elements piezoelèctrics en sòls molt concorreguts, per exemple, centres i carrers comercials, edificis públics, estacions de transport públic, etc.

D'aquesta manera, es podria aprofitar part de l'energia que generarien les persones al caminar per sobre dels captadors piezoelèctrics de forma pràcticament ininterrompuda al llarg del dia.

### *9.1.2. Obtenció d'energia a partir de la circulació de vehicles en carrers i carreteres.*

Consistiria en instal·lar elements piezoelèctrics pocs centímetres per sota de la superfície d'asfalt de carrers i carreteres.

D'aquesta manera, es podria captar i reaprofitar part de l'energia dissipada pels vehicles quan circulen. Si la carrer o carretera on s'instal·lés el sistema de captació fos una via important, la generació d'energia seria pràcticament ininterrompuda al llarg del dia.

### *9.1.3. Obtenció d'energia a partir de les turbulències provocades per vehicles.*

Consistiria en instal·lar làmines flexibles de material piezoelèctric (film piezoelèctric) en les mitjanes de vies de comunicació importants, tals com autopistes i autopistes.

D'aquesta manera, les turbulències provocades pels vehicles al circular a velocitats elevades provocarien oscil·lacions en els captadors piezoelèctrics, de manera que aquests generarien energia.

### *9.1.4. Arbre piezoelèctric.*

Consistiria en imitar l'estructura d'un arbre i substituir les seves fulles per film piezoelèctric. D'aquesta manera s'aprofitaria part de l'energia del vent per generar electricitat a través de la oscil·lació dels captadors piezoelèctrics.

### *9.1.5. Aprofitament de l'energia de la pluja.*

Consistiria en instal·lar captadors piezoelèctrics en espais tals com teulades o altres llocs elevats, on l'aigua de la pluja hi incideix sense cap tipus d'interferència. D'aquesta manera, en dies de pluja, es generaria energia elèctrica a partir de l'impacte directe de les gotes de pluja en la superfície dels elements piezoelèctrics de captació.

## 9.2. Microgeneració

### *9.2.1. Augment de l'autonomia de la bateria d'un PC portàtil.*

Consistiria en instal·lar elements piezoelèctrics en el teclat d'un ordinador portàtil amb l'objectiu de generar energia a partir dels cops que reben les tecles a l'escriure. Aquesta energia podria ser utilitzada per a recarregar la bateria del PC de manera que s'allargaria la seva autonomia.

### *9.2.2. Augment de l'autonomia d'un teclat inalàmblic.*

Seguint el mateix principi que en la proposta d'aplicació número 6, en aquest cas els captadors piezoelèctrics s'instal·larien en les tecles d'un teclat sense fils per a ordinador. L'energia generada podria servir per recarregar la bateria del teclat, de manera que augmentaria la seva autonomia.

### *9.2.3. Sensors autònoms.*

Els sensors són utilitzats en una gran varietat de camps amb l'objectiu de recollir dades sobre una determinada magnitud física. En la majoria de casos, aquests sensors necessiten una alimentació auxiliar per a poder funcionar.

El plantejament d'aquesta aplicació hipotètica, és dotar a sensors sotmesos a unes determinades condicions, de captadors piezoelèctrics que els permetin captar l'energia de l'entorn en forma de vibracions per tal d'aconseguir una autonomia total d'aquests sensors. Aquesta aplicació, només seria factible per a sensors situats en determinats ambients.

### *9.2.4. Augment de l'autonomia d'un telèfon mòbil.*

Consistiria en instal·lar un element piezoelèctric en la part del darrere d'un telèfon mòbil. Considerant que un telèfon mòbil està constantment sotmès a cops, pressions i fregaments, el captador piezoelèctric permetria recuperar part de l'energia dissipada en aquestes situacions per tal d'augmentar l'autonomia de la bateria del cel·lular.

# **CAPÍTOL 10:**

## **DESENVOLUPAMENT**

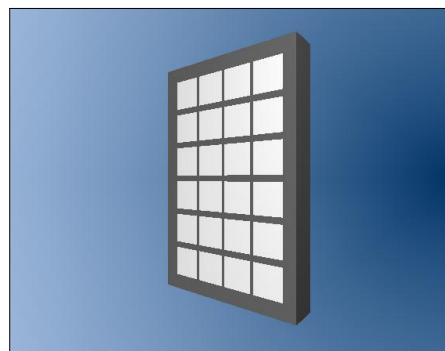
### **DE L'APLICACIÓ DEL**

#### **TELÈFON MÒBIL.**

#### **10.1. Descripció de l'aplicació.**

Aquesta aplicació consistiria en instal·lar una matriu d'elements piezoelèctrics a la part posterior d'un telèfon mòbil. D'aquesta manera, els piezoelèctrics absorbirien tota mena de cops, pressions, fregaments i vibracions que pogués rebre el telèfon mòbil, transformant la seva energia mecànica en energia elèctrica la qual s'utilitzaria per recarregar la bateria, millorant d'aquesta manera l'autonomia del cel·lular.

En la figura 24 i 25 es pot apreciar un croquis de l'aplicació plantejada i una vista en 3D respectivament. Cal dir que les mides visibles en el croquis no corresponen a cap cas concret i per tant són orientatives. Això significa que la mida del mòbil variarà en funció del model en el qual es vulgui instal·lar l'aplicació. De la mateixa manera, la mida de la matriu de piezoelèctrics pot variar en funció de la mida dels elements piezoelèctrics que es decideixi instal·lar i de la superfície total que sigui necessari cobrir.



*Figura 24: Imatge 3D Piezo-mòbil.*



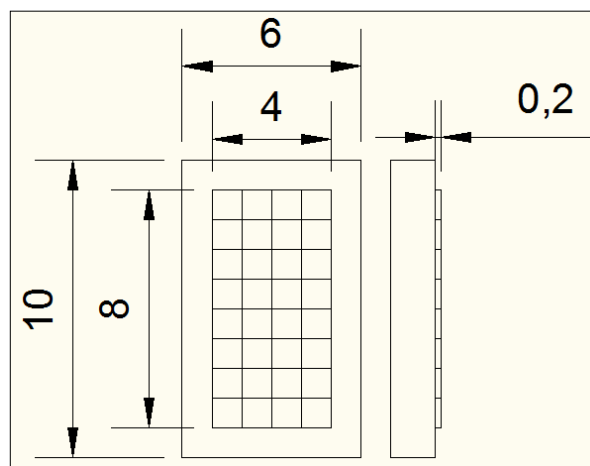


Figura 25: Disposició dels piezoelèctrics.

## 10.2. Recol·lecció d'energia a través del telèfon mòbil.

Generalment, un telèfon mòbil s'acostuma a transportar en dos llocs determinats. En el cas dels homes, la ubicació més habitual és la butxaca lateral dels pantalons. D'altra banda, les dones acostumen a portar el telèfon mòbil o bé en aquesta mateixa butxaca o bé a l'interior de la bossa demà.

Per últim, una altra situació d'estudi interessant és quan l'usuari té el telèfon mòbil a les seves mans per tal d'utilitzar-lo

Així doncs, a partir d'aquest punt, el present estudi queda dividit en tres parts, una es centrarà en l'anàlisi de la butxaca com a medi de transport, la següent enfocarà la bossa de mà com a medi de transport i l'última estudiarà la situació d'utilització del cel·lular.

## 10.3. Estudi previ.

En aquest apartat es pretén determinar les característiques generals sobre el mòbil que utilitzarem com a dades per a fer els posteriors càlculs. Així com també la freqüència al caminar d'una persona. Dades imprescindibles per a efectuar els posteriors estudis sobre el mòbil durant els seu transport.

### 10.3.1. Estudi del medi.

#### **Característiques del mòbil.**

Per a la realització del present estudi, considerarem una massa del telèfon mòbil de:

$$m_{tf} = 115 \text{ g}$$

Aquest és el valor mig entre 90 g i 140g, que segons catàlegs de les companyies Orange i Movistar de novembre de 2010, és el rang de massa dels telèfons mòbils mes venuts.

### **Freqüència al caminar.**

La freqüència amb que les forces determinades seran aplicades sobre l'element piezoelèctric, dependrà directament de la freqüència amb que camini la persona que porti el telèfon. Així doncs es fa necessari estimar la freqüència amb que camina una persona normal. Per fer-ho, partirem de la velocitat mitjana a la que aquestes es desplacen al caminar. Font: Wikipedia.

$$v = 5 \text{ km/h} = 1,388 \text{ m/s}$$

D'altra banda, de forma experimental hem constatat que, aproximadament, la passa d'una persona es pot estimar en uns 70cm d'amplitud. Aquesta dada variarà en funció de l'alçada de cada persona i de la seva pròpia manera de caminar, però la considerem vàlida per a obtenir uns resultats orientatius. Amb les dades de velocitat i amplitud del pas, podem determinar la freqüència de pas:

$$f = v \cdot a = 1,388 \text{ m/s} \cdot 0,7 \text{ m/pas} = 1,98 \approx 2 \text{ passos/segon} \quad (56)$$

$f$  = freqüència de pas

$v$  = velocitat de desplaçament

$a$  = amplitud de pas

## **10.4. Estudi físic sobre la butxaca com a medi de transport.**

### **10.4.1. Estudi del medi.**

Si un telèfon mòbil és transportat en la butxaca lateral d'uns pantalons texans la seva carcassa estarà sotmesa a una pressió variable quan la persona que transporta el telèfon estigui caminant. Aquesta pressió serà una conseqüència de la tensió mecànica que es produirà en les fibres dels texans degut als moviments de la persona.

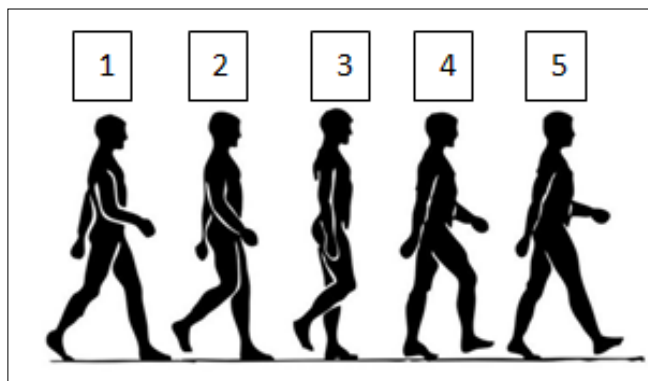


Figura 26: Fases del caminar.

Si suposem que el telèfon és transportat a la butxaca de la dreta i analitzem la figura 26, veiem que la pressió augmentarà progressivament en els moviments 2, 3 i 4, mentre que disminuirà, també de forma progressiva, en els moviments 5 i 1.

#### *10.4.2. Càlculs sobre la força que rep un telèfon mòbil als ser transportat a la butxaca.*

##### **Determinació de la força.**

Determinar les forces aplicades sobre el telèfon mòbil quan és transportat dins la butxaca de forma teòrica, suposa resoldre un problema complex i indeterminat. Degut a que la finalitat d'aquest estudi és obtenir uns valors aproximats de les forces, s'ha optat per fer un anàlisi experimental del cas en estudi.

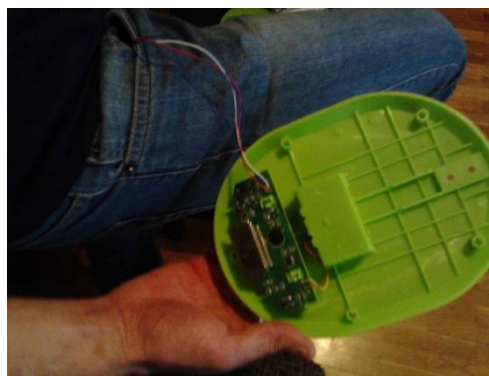
Aquest anàlisi ha consistit en la utilització d'una bàscula de cuina digital, convenientment adaptada, per obtenir una estimació fiable de les forces que es pretén determinar.

Les següents imatges, mostren el muntatge realitzat.

El procediment realitzat ha consistit en situar la sonda de mesura a l'interior de la butxaca d'uns pantalons texans. Fet això, s'ha restablert el zero de la bàscula (*funció Tare*), de manera que la pressió permanent sobre telèfon no s'ha contemplat en la mesura de la força exercida. A continuació, s'ha caminat i per observar que la pressió sobre la sonda arribava a uns valors màxims entre 110 i 150 grams tot passant per zero entre cada oscil·lació. Així doncs, prendrem com a valor útil el valor mig entre aquestes dues xifres, és a dir, 130g.



*Figura 28: Sonda.*



*Figura 27: Col·locació de la sonda.*



*Figura 29: Mesura presa per la sonda.*

Per determinar la força que rebrà el piezoelèctric, ens valdrem de la següent expressió:

$$1Pa = 0,102 \cdot 10^{-4} kg/cm^2$$

La superfície del sensor utilitzat és:

$$S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 1,4^2 = 6,157 cm^2 \quad (57)$$

Aplicant factors de conversió, podem determinar que la força serà:

$$P = \frac{0,13 kg}{6,157 cm^2} \cdot \frac{1 Pa}{0,102 \cdot \frac{10^{-4} kg}{cm^2}} = 2070,01 Pa \quad (58)$$

$$F = 2070,01 \frac{N}{m^2} \cdot \frac{1 m^2}{1000 cm^2} \cdot 6,157 cm^2 = \mathbf{1,274 N} \quad (59)$$

### **Direcció de la força.**

Amb el procediment anterior, hem determinat el valor de la força aplicada sobre el telèfon mòbil però no la seva direcció. Intuïtivament, podem dir que la major part d'aquesta força serà perpendicular al telèfon, la qual cosa indica la presència d'una component paral·lela al cel·lular. Tot i que és molt difícil determinar l'angle d'incidència de la força de forma experimental, el fet de suposar que aquesta serà majoritàriament perpendicular al telèfon, ens permet suposar també, que l'angle tindrà un valor baix respecte a la perpendicular. Així doncs, plantejarem tres casos en els quals estimarem diferents valors per a l'angle d'incidència. D'aquesta manera, podrem veure l'afectació que aquest angle tindria sobre la component perpendicular de la força en funció del seu valor.

#### **HIPÒTESI 1 – ANGLE D'INCIDÈNCIA DE 10°.**

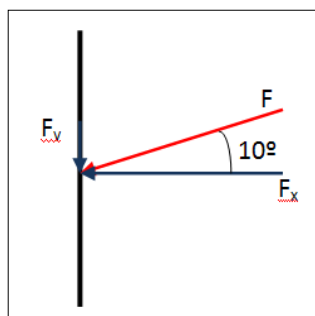


Figura 30: Angle incidència a 10°.

Taula 2: Forces amb angle de 10°.

F	1,274 N
F <sub>x</sub>	1,254 N
F <sub>y</sub>	0,221 N

$$F_x = F \cdot \cos 10 \quad (60)$$

$$F_y = F \cdot \sin 10 \quad (61)$$

**HIPÒTESI 1 – ANGLE D'INCIDÈNCIA DE 5°.**

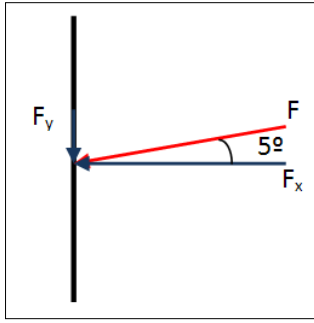


Figura 31: Angle d'incidència a 5°.

Taula 3: Forces amb angle de 5°

F	1,274 N
$F_x$	1,269 N
$F_y$	0,110 N

$$F_x = F \cdot \cos 5 \quad (62)$$

$$F_y = F \cdot \sin 5 \quad (63)$$

**HIPÒTESI 1 – ANGLE D'INCIDÈNCIA DE 0°.**

Aquest és el cas ideal i per tant serà el que ens servirà de model per quantificar la diferència respecte als casos anteriors.

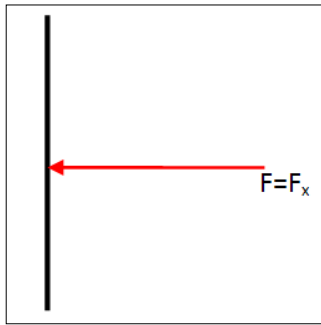


Figura 32: Angle d'incidència 0.

Taula 4: Forces amb angle de 0°

F	1,274 N
$F_x$	1,274 N
$F_y$	0,000 N

$$F_x = F \quad (64)$$

$$F_y = 0 \quad (65)$$

L'error relatiu de les hipòtesis 1 i 2 respecte al cas ideal (hipòtesi 3) serà:

$$\varepsilon(\%) = \frac{F_{X3} - F_{XH}}{F_{X3}} \cdot 100 \quad (66)$$

$F_{X3}$ : és la  $F_x$  de la tercera hipòtesi.

$F_{XH}$ : és la  $F_x$  de la hipòtesi que estiguem comparant.

Així doncs tenim que:

$$\varepsilon_{H1} = \frac{1,274 - 1,254}{1,274} \cdot 100 = 1,57 \% \quad (66.1)$$

$$\varepsilon_{H2} = \frac{1,274 - 1,269}{1,274} \cdot 100 = 0,39 \% \quad (66.2)$$

Veient que en cap cas l'error obtingut supera el 10% i que per obtenir errors superiors a aquest valor l'angle d'incidència hauria d'augmentar

considerablement, podem menysprear la component  $F_y$  de la força aplicada i per tant, suposar que la força que rep el telèfon mòbil és completament perpendicular a ell i pren un valor d'1,274N.

## 10.5. Estudi físic sobre la bossa de mà com a medi de transport.

### 10.5.1. Estudi del medi.

En aquesta situació, suposarem que sobre el telèfon mòbil, actuen dos tipus de forces que analitzarem per separat. D'una banda, estudiarem el fregament present entre el telèfon i els elements del seu voltant quan aquest es troba en un lloc fix.

D'altra banda, també analitzarem la força que actua sobre el telèfon mòbil quan aquest es troba a la part inferior de la bossa i la resta d'elements presents en el seu interior exerceixen una pressió intermitent sobre el telèfon.

Ambdues forces, tindran lloc en funció de la disposició del telèfon a l'interior de la bossa i de la freqüència amb la que la persona que porta la bossa camini.

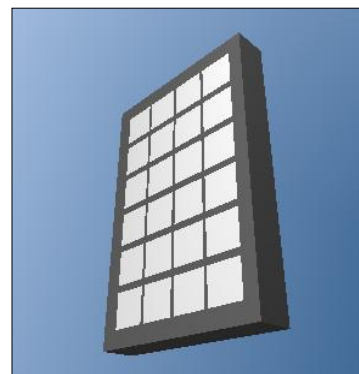


FIGURA 33: Imatge 3D Piezo-mòbil.

### 10.5.2. Càlculs sobre la força al transportar un telèfon mòbil en una bossa de mà.

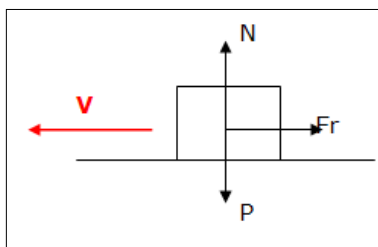


FIGURA 34: Diagrama de forces.

La figura 34 mostra un diagrama esquemàtic on  $F_{Fr}$  és la força a determinar. Sabem que la força de fregament generada per dues superfícies en contacte que es desplacen l'una respecte de l'altra, es determina mitjançant la següent expressió:

$$F_r = \mu \cdot N \quad (67)$$

$F$  = força de fregament

$\mu$  = coeficient de fregament dinàmic

$N$  = força normal

### **Força normal $N$ .**

Suposant que el telèfon mòbil es troba ubicat sobre la superfície d'algun altre element present a l'interior de la bossa de mà, la força normal representa la reacció d'aquesta superfície davant la força que exerceix el telèfon sobre ella. Per tant, aquesta força normal tindrà un valor idèntic al del pes del mòbil i el seu sentit serà el contrari del que la força que la provoca, és a dir, el pes.

Per tant, per aquest estudi, la normal prendrà un valor de:

$$N = -P \quad (68)$$

$$P = mg = 115 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 = 1,12 \text{ N} \quad (69)$$

On:

$P =$  pes del telèfon mòbil

$m =$  massa del telèfon

$g =$  acceleració de la gravetat.

### **Coefficient de fregament $\mu$ .**

El coeficient de fregament, és un valor adimensional propi de les dues superfícies en que té lloc el fregament. D'una banda doncs, tindrem l'element piezoelèctric, que serà del tipus ceràmic. D'altra banda, cal determinar la composició de la superfície sobre la qual s'ubicarà el telèfon. A continuació, s'enumeren objectes habituals propensos a ser transportats en una bossa de mà i amb suficient superfície perquè hi càpiga un telèfon mòbil en ella: paquet de mocadors (plàstic), funda d'ulleres (plàstic), paquet o caixetí de tabac (plàstic, cartró o metall), cartera o moneder (pell o roba), agenda (plàstic o cartró), complements de vestimenta: guants, bufanda, etc. (roba), ...

En els objectes enumerats, podem veure que els materials que més es repeteixen són el plàstic, la roba i el cartró. Així doncs, caldrà determinar el coeficient de fregament dinàmic entre superfícies de: ceràmica- plàstic, ceràmica - roba, ceràmica - cartró. Ja que no hi ha dades específiques sobre els coeficients de fregament dinàmic que busquem, i la determinació d'aquests de forma experimental requereix uns mitjans dels quals no disposem, treballarem amb estimacions d'aquests coeficients.

Partint de que el material piezoelèctric, degut a la seva base ceràmica, tindrà una textura bastant llisa i que tant el plàstic, com el cartró com la roba no presenten una rugositat excessiva, podem suposar que els coeficients de fregament dinàmics amb els que hem de treballar seran baixos i semblants entre ells. Per aquest motiu, atorgarem a tots els materials un mateix coeficient de fregament. D'aquesta manera, obtindrem uns resultats que no seran exactes però sí orientatius.

Amb l'objectiu de moure'ns dins d'un rang de forces, prendrem dos valors diferents per al coeficient de fregament. Establirem la següent relació entre els coeficients estimats.

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = 0,5$$

**Estimació 1 –  $\mu_1=0,2$** 

Suposant un coeficient de fregament dinàmic de 0,2 la força de fregament serà:

$$F_r = \mu_1 \cdot N = 0,2 \cdot 1,12 = \mathbf{0,224\ N} \quad (67.1)$$

**Estimació 2 –  $\mu_2=0,4$** 

Suposant un coeficient de fregament dinàmic de 0,4 la força de fregament serà:

$$F_r = \mu_2 \cdot N = 0,4 \cdot 1,12 = \mathbf{0,448\ N} \quad (67.2)$$

**Forces per inèrcia.**

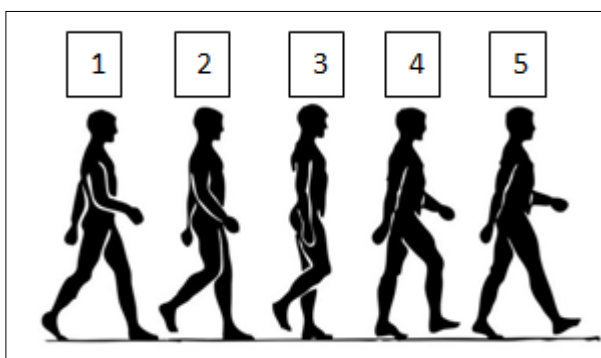
A l'interior d'una bossa de mà, un telèfon mòbil es susceptible de tenir altres objectes damunt seu. Aquests objectes, exerciran una força sobre el telèfon que dependrà del pes d'aquests objectes i de la freqüència amb que la bossa de mà sigui sacsejada com a conseqüència del caminar del seu portador.

La força exercida sobre el telèfon mòbil, dependrà directament de l'objecte o objectes que es trobin sobre seu. En la taula 5, es fixen unes masses estàndard per als diversos objectes amb presència habitual dins una bossa de mà.

Taula 5: Massa estàndard dels objectes.

Ojecte	Massa (g)
Paquet de tabac	20
Moneder	150
Funda d'ulleres (plena)	120
Funda d'ulleres (buida)	60
Agenda	240

La figura 35 mostra la seqüència de moviments que fa una persona al caminar. Suposant que aquesta persona transporta una bossa de mà penjada a l'espatlla, com és habitual, veiem que aquesta bossa



Analitzant la seqüència, veiem que ens els moviments 2, 3 i 4 la bossa es trobaria en una posició més elevada que en els moviments 1 i 5, per tant, al caminar, la bossa serà sacsejada cap amunt i cap avall de forma contínua.

FIGURA 35: Seqüència de moviments al caminar.



Aquest mateix moviment serà el que seguiran els objectes de l'interior de la bossa, de manera que en l'instant en que finalitzi el moviment de baixada per tornar a donar pas al de pujada, els objectes que es trobin a la part superior, exerciran pressió sobre els objectes que es trobin en la part inferior, com a conseqüència de la inèrcia del moviment de baixada.

### **DETERMINACIÓ DE LA FORÇA.**

Suposant que el telèfon mòbil es troba en la part inferior de la bossa, podem modelar la pressió que aquest rebrà dels altres objectes com la força que es produiria per una caiguda lliure de curt recorregut dels segons.

En un moviment de caiguda lliure, la acceleració és constant, de manera que:

$$F = m \cdot a = m \cdot g = m \cdot 9,81 \quad (70)$$

Així doncs, per a cadascun dels objectes previstos, la força serà la que es mostra en la taula 6.

*Taula 6: Força de cada objecte.*

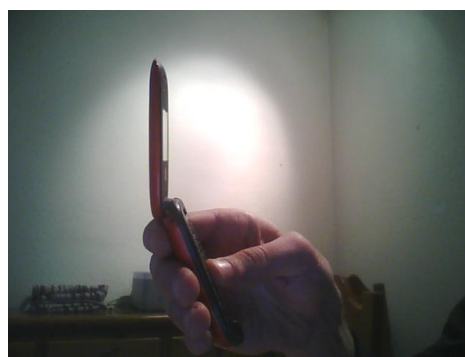
Objecte	Força (N)
Paquet de tabac	0,196
Moneder	1,471
Funda d'ulleres (buida)	1,177
Funda d'ulleres (plena)	0,588
Agenda	2,354

## 10.6. Estudi físic sobre la utilització del telèfon mòbil.

### *10.6.1. Estudi del medi.*

Generalment, quan s'utilitza un telèfon mòbil, aquest es subjecta de tal manera que tots els dits menys el polze se situen a la seva part posterior, mentre que amb el dit polze es premen les tecles. Així doncs, al pulsar una tecla, estem empenyent el telèfon contra els nostres propis dits.

Tenint en compte aquest fet, podem dir que cada vegada que premem una tecla del nostre telèfon, la seva part posterior rebrà una força que serà la reacció dels nostres dits per mantenir el telèfon quiet. Les següents imatges, mostren la manera habitual de subjectar el telèfon mòbil quan se n'està fent us.



*FIGURA 36: Mòbil subjectat 1.*

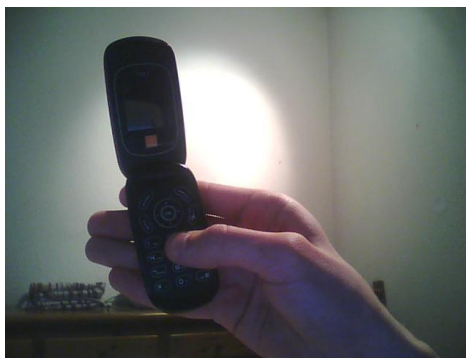


FIGURA 37: Mòbil subjectat 2.

A continuació, s'esquematitza la situació plantejada i s'indiquen les forces que hi intervenen:

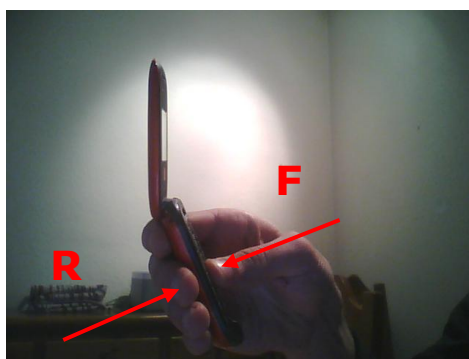


FIGURA 38: Diagrama de forces.

La força F representa la força aplicada sobre la tecla del telèfon. D'altra banda, la força R representa la reacció dels dits que eviten que el telèfon es desplaci quan s'aplica la força F. Ja que no intervenen més forces en el sistema plantejat, podem dir que:

$$F = R \quad (71)$$

#### 10.6.2. Càlcul sobre la força exercida al mòbil durant la seva utilització.

Per determinar el valor de la força aplicada sobre el telèfon quan es prem una tecla, s'ha utilitzat una bàscula de cuina digital. El procediment realitzat ha consistit en situar el telèfon mòbil sobre la bàscula i restablir el zero d'aquesta (*funció Tare*), de manera que el pes del telèfon no serà contemplat en la mesura de la força exercida. A continuació, s'han realitzat 20 assajos en que s'ha premut la tecla i s'ha anotat la lectura de la bàscula. La següent taula mostra aquestes lectures:

Taula 7: Mesures preses en l'assaig.

Mesura	Massa (g)	Mesura	Massa (g)
1	427	11	418
2	489	12	440
3	378	13	426
4	436	14	449
5	390	15	393
6	413	16	414
7	402	17	437
8	330	18	450
9	420	19	368
10	371	20	397

A partir de les dades obtingudes, calculem la seva mitjana per poder treballar amb un únic valor representatiu.

$$\bar{m} = 410,918 \text{ g} \approx 411 \text{ g}$$

A continuació es mostren unes imatges del muntatge realitzat:



FIGURA 40: Muntatge per determinar força 1.

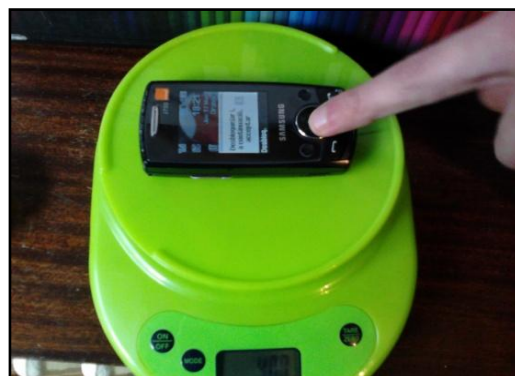


FIGURA 39: Muntatge per determinar força 2.

Ja que:

$$F = mg \quad (72)$$

En el nostre cas:

$$F = 0,411 \cdot 9,81 = 4,03 \text{ N} \quad (72.1)$$

## 10.7. Quadre resum dels resultat obtinguts.

Taula 8: Força dels objectes bossa de mà i altres dades rellevants..

OBJECTE	MASSA (g)	Força (N)
Paquet de tabac	20	0,196
Moneder	150	1,471
Funda d'ulleres (plena)	120	1,177
Funda d'ulleres (buida)	60	0,588
Agenda	240	2,354

Dades característiques del mòbil.	
Massa tlf [g]	Pes Tlf [N]
115	1,12
Freqüència [Passos/segon]	
2	
Força Butxaca[N]	
1,274	
Força al prèmer tecla [N]	
4,03	

## 10.8. Càlculs piezoelèctrics aplicació mòbil.

Partint de les premisses que s'està treballant amb forces d'un valor baix i per tant cal obtenir la major càrrega possible per unitat de força; i que per tal d'aconseguir un bon funcionament del generador piezoelèctric, la pressió que aquest rep ha de ser aplicada de la forma més uniforme possible; s'han seleccionat una sèrie d'actuadors piezoelèctrics per tal de calcular la tensió de sortida que aquests oferirien al ser sotmesos als rangs de força determinats en l'apartat anterior.

D'acord amb les condicions exposades anteriorment, el criteri de selecció dels piezoelèctrics s'ha realitzat en base al fet de tenir un coeficient  $d_{33}$  el més elevat possible i unes mides prou reduïdes per poder rebre les pressions de forma uniforme. Les propietats i característiques principals de cada actuator seleccionat, es poden trobar en l'Annex 4 – Característiques i especificacions d'actuadors piezoelèctrics.

D'altra banda, en funció de les mides de cada actuator piezoelèctric, s'ha determinat el nombre d'elements que es necessitarien per cobrir una superfície de 32 cm<sup>2</sup>, la qual s'ha pres com a estimació en el corquis de l'aplicació. Aquest, és un factor important ja que serà el que més pes tindrà en el preu de l'aplicació. (Veure pressupost)

Per tal de simplificar la notació en les taules de resultats, la *taula 9* mostra el nom atorgat a cadascuna de les forces amb que es treballarà.

Taula 9: llegenda de noms de cada força.

Força	Nom	Valor (N)
Força Butxaca	F1	1,274
Paquet de tabac	F2	0,196
Moneder	F3	1,471
Funda d'ulleres plena	F4	1,177
Funda d'ulleres buida	F5	0,588
Agenda	F6	2,354
Força Utilització mòbil	F7	4,03

La següent taula mostra els valors de tensió obtinguts per a cadascun dels actuadors escollits.

Taula 10: Característiques dels elements piezoelèctrics.

Actuador	CMA01	CMA02	CMA09	PL033.30	PL055.30
Fabricant	Noliac	Noliac	Noliac	Piceramic	Piceramic
C [nF]	500	1460	440	80	250
$d_{33}$ [pC/N]	37950	39100	10200	13600	14400
Mida [mm]	3x3x2	5x5x2	10x10x2	3x3x2	5x5x2
Nombre d'unitats	338	128	32	338	128
Superfície coberta [cm <sup>2</sup> ]	30,42	32	32	30,42	32
$V_{F1}$ [mV]	96,69	34,11	29,53	215,78	73,38
$V_{F2}$ [mV]	14,87	5,24	4,54	33,32	11,28
$V_{F3}$ [mV]	111,64	39,39	34,1	250,07	84,72
$V_{F4}$ [mV]	89,33	31,52	27,28	200,09	67,79
$V_{F5}$ [mV]	44,62	15,74	13,63	99,96	33,86
$V_{F6}$ [mV]	178,66	63,04	54,57	400,18	135,59
$V_{F7}$ [mV]	305,87	107,92	93,42	685,1	232,12

## 10.9. Conclusions i comentaris sobre els resultats.

- En tots els casos fa falta una quantitat d'actuadors elevada per cobrir la superfície considerada inicialment. Des del punt de vista econòmic, aquesta solució seria inviable ja que té un preu molt car (veure pressupost). Existeixen dues possibles alternatives: o bé reduir l'àrea coberta per material piezoelèctric, o bé instal·lar un actuator fet a mida. Aquesta segona possibilitat però, empitjoraria el valor de la tensió de sortida (degut a la capacitat elevada que tindria l'actuator per les seves dimensions) i el funcionament de l'aplicació (ja que la força no seria aplicada uniformement en tot l'element). Per aquests motius sembla més viable la primera solució proposada consistent en reduir l'àrea coberta per actuadors.
- Els valors de tensió de sortida obtinguts, són insuficients per aprofitar l'energia generada. A més, cal tenir en compte que aquests valors es veurien reduïts considerablement a l'associar un condensador d'emmagatzematge al sistema, el qual és un component indispensable per a poder condicionar el senyal de sortida i fer-lo útil per a l'alimentació de dispositius.
- Entenem que no és productiu estudiar la incorporació d'una etapa elevadora de tensió, ja que els valors de tensió obtinguts difícilment superarien la tensió llindar dels díodes que la componen.
- Cal atribuir el baix valor dels nivells de tensió de sortida obtinguts per als diferents actuadors al baix valor de la força aplicada sobre els elements piezoelèctrics. Aquest fet ens porta a concloure que aquesta aplicació no és útil de la manera en que s'ha plantejat. Caldria replantejar la manera com s'ha enfocat l'aprofitament de l'energia de cops i fregaments.

# **CAPÍTOL 11:**

## **DESENVOLUPAMENT**

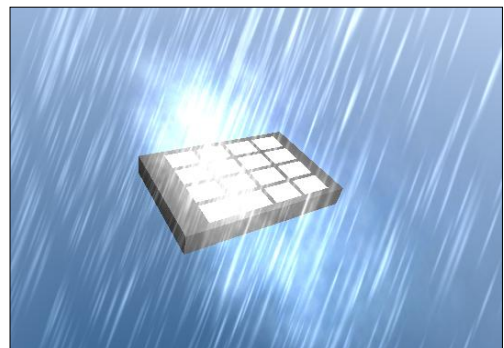
### **DE L'APLICACIÓ DE LA**

#### **PLUJA.**

#### **11.1. Descripció de l'aplicació.**

Aquesta aplicació consistiria en instal·lar una matriu d'elements piezoelèctrics en una superfície a l'aire lliure, les mides de la qual podrien ser completament variables en funció de l'ús que es donés a l'aplicació. D'aquesta manera, en dies de pluja, la matriu piezoelèctrica rebria de forma directa l'impacte de les gotes de precipitació, transformant la seva energia en energia elèctrica.

Degut a que aquesta aplicació treballaria amb forces baixes, l'energia generada també seria baixa, i per tant, en cas de que fos suficient, el seu ús aniria encarat cap a l'alimentació de dispositius de baix consum, per exemple sensors.



*FIGURA 41: Imatge 3D Piezo Pluja.*

## 11.2. Estudi físic sobre les gotes d'aigua.

Aquest apartat es centra en els càlculs realitzats per a determinar la força de les gotes quan impacten sobre una superfície. Aquests valors de força seran els que s'utilitzaran per a calcular l'energia que es podrà extreure del material piezoelèctric.

### 11.2.1. Estudi del medi.

Per a fer aquest estudi hem cregut necessari classificar les diverses tipologies de gotes existents, ja que en funció d'aquests l'energia varia. Per fer aquesta classificació ens hem centrat en les dades que facilita l'Agència estatal de meteorologia (Aemet).

#### **Tipus de gotes.**

El servei de meteorologia de Catalunya (Meteocat) ens va oferir la taula que segueix per a determinar uns valors sobre els diferents diàmetres de les gotes. Extret d'un llibre d'introducció a la meteorologia, *Meteorology Today*, de C. Donald Ahrens. No obstant hem considerat necessari construir una taula pròpia amb un rang de diàmetres determinat els quals s'ajustessin a les necessitats del projecte. Els valors centrals són els proporcionats pel llibre *Meteorology Today*, i els dels extrems són una aproximació.

Taula 11: Diàmetre gotes d'aigua.

Tipus gota	Diàmetre[mm]
Molt petita	0,4
Petita	1
Mitjana	2
Gran	5
Molt gran	6

Cal afegir que tots els valors que pugem trobar respecte el diàmetre de les gotes són valors de referència que s'han extret d'un estudi estadístic i per tant són una aproximació de la realitat que ens serveixen per a els respectius càlculs.

### 11.2.2. Càlculs sobre els tipus de gotes.

Seguidament es presenten tots els càlculs efectuats per a determinar la força exercida d'una gota al impactar en una superfície.

#### **Volum de les gotes:**

Es considera que les gotes tenen forma esfèrica, per tant podem determinar el seu volum a través de la fórmula del volum d'una esfera.

$$Volum esfera = \frac{4\pi \cdot r^3}{3} \quad (73)$$



Taula 12: Volum de les gotes.

Tipus gota	Diàmetre[mm]	Volum[mm <sup>3</sup> ]
Molt petita	0,4	0,033
Petita	1	0,523
Mitjana	2	4,188
Gran	5	65,449
Molt gran	6	113,097

### Densitat de les gotes:

Un cop obtingut el volum de cada tipus de gota, calculem la seva massa a través de la densitat de l'aigua.

$$Massa = \rho \cdot Volum \quad (74)$$

$\rho$ : Densitat

La densitat de l'aigua és  $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$ , ens interessa calcular la massa i en la unitat de grams . Per tant hem de convertir la densitat de  $\text{Kg/m}^3$  en  $\text{g/mm}^3$  , i obtenim que:

$$\rho = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1000 \text{ g}}{\text{Kg}} \cdot \frac{\text{m}^3}{1 \times 10^9 \text{ mm}^3} = 0,001 \frac{\text{g}}{\text{mm}^3} \quad (75)$$

Taula 13: Massa de les gotes.

Tipus gota	Diàmetre[mm]	Volum[mm <sup>3</sup> ]	Massa[g]
Molt petita	0,4	0,03351	3,351E-05
Petita	1	0,52360	5,236E-04
Mitjana	2	4,18879	4,189E-03
Gran	5	65,44985	6,545E-02
Molt gran	6	113,09734	1,131E-01

### 11.2.3. Càlcul de la Força de les gotes.

Per tal de fer el càlcul de la força exercida per les gotes a l'impactar en una superfície, s'ha utilitzat l'aproximació de la força d'impuls. En aquesta aproximació es suposa que una de les forces que actua sobre la partícula és molt gran però de curta duració. És per tant una aproximació molt útil quan s'estudien col·lisions, com és el nostre cas.

### **Força d'impuls .**

L'impuls es defineix com la variació de la quantitat de moviment d'un cos.

$$Impuls = \int F \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{dP}{dt} \right) \cdot dt = P_{t_2} - P_{t_1} = \Delta P \quad (76)$$

Per altre banda la força que actua durant en interval de temps curt, s'anomena força d'impuls i la seva expressió és la següent:

$$F = \frac{I}{\Delta t} \quad (77)$$

Per tant les forces que exerciran les gotes de pluja sobre la superfície es pot calcular a través de:

$$F = \frac{\Delta P}{\Delta t} \quad (78)$$

$\Delta P =$  Variació de quantitat de moviment.

$\Delta t =$  Variació de temps.

### **Quantitat de moviment.**

S'ha utilitzat l'expressió següent de quantitat de moviment.

$$\Delta P = m \cdot v_f - m \cdot v_i \quad (79)$$

$m =$  Massa.

$v_f =$  Velocitat final.

$v_i =$  Velocitat inicial . En aquest cas velocitat límitl.

Cal afegir que estem fent el càlcul de la quantitat de moviment que té una gota d'aigua en el moment del impacte amb la superfície. On la velocitat final serà sempre zero (velocitat després del impacte) i la velocitat inicial (velocitat límit o velocitat terminal) serà la velocitat a la que es mou la gota just en l'instant abans de xocar amb la superfície.

Per tant encara ens cal saber el valor de la velocitat terminal per a poder fer el càlcul de la quantitat de moviment.

### **Velocitat terminal de les gotes.**

La velocitat terminal és la màxima velocitat que adquirirà un cos movent-se en un fluid infinit sota l'acció d'una força constant. En aquest cas, el fluid és l'aire i la força constant la gravetat.

El llibre *Meteorology Today*, de C. Donald Ahrens, apart de fer una classificació en funció del diàmetre de les gotes, també determina una velocitat terminal per a cada diàmetre, com es mostra en la taula següent:

*Taula 14: Velocitat terminal.*

Diàmetre [μm]	Velocitat terminal [m/s]
0.2	0.0000001
20	0.01
100	0.27
200	0.7
1000	4.0
2000	6.5
5000	9.0

Com ja s'ha comentat anteriorment en aquest projecte s'ha utilitzat un altre rang de diàmetres on la seva velocitat terminal és la següent:

*Taula 15: velocitat terminal en el rang d'aplicació.*

Tipus gota	Diàmetre [mm]	Vel terminal [m/s]
Molt petita	0,4	1,30
Petita	1	4,00
Mitjana	2	6,50
Gran	5	9,00
Molt gran	6	9,80

Amb les dades obtingudes podem fer el càlcul de la quantitat de moviment.

En aquest cas tant sols es contempla la velocitat inicial ja que es considera la velocitat final com la velocitat després del impacte, per tant zero. Els resultats de la quantitat de moviment es mostren en la taula següent.

Taula 16: Quantitat de moviment.

Tipus gota	Diàmetre [mm]	Quantitat moviment [kg·m/s]
Molt petita	0,4	4,356E-08
Petita	1	2,094E-06
Mitjana	2	2,723E-05
Gran	5	5,890E-04
Molt gran	6	1,108E-03

**Increment de temps.**

Ara tant sols ens cal determinar una variació de temps per poder fer el càlcul de la força de les gotes. Per a determinar la variació de temps ens ajudem de l'expressió següent:

$$\Delta t = \frac{e}{v} \quad (80)$$

$e$  = Espai recorregut. En el nostre cas el diàmetre.

$v$  = Velocitat. En aquest cas la velocitat límit.

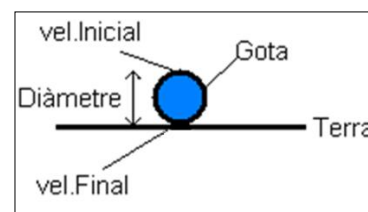


FIGURA 42: Esquema d'una gota al impactar contra el terra.

Els resultat són els següents:

Taula 17: Interval de temps.

Tipus gota	Diàmetre [mm]	Increment temps[s]
Molt petita	0,4	3,077E-04
Petita	1	2,500E-04
Mitjana	2	3,077E-04
Gran	5	5,556E-04
Molt gran	6	6,122E-04

Ara ja podem fer el càlcul de la força de cada gota, els resultats són el següents:  
Recordar que:

$$F = \frac{\Delta P}{\Delta t} \quad (81)$$

Taula 18: Força de cada gota.

Tipus gota	Diàmetre [mm]	Força [N]
Molt petita	0,4	0,0001
Petita	1	0,0084
Mitjana	2	0,0885
Gran	5	1,0603
Molt gran	6	1,8103

## 11.3. Estudi físic sobre els tipus de pluja.

Aquest capítol pretén fer un estudi teòric en funció del tipus de pluja, per tal d'obtenir dades com ara la força acumulada o la freqüència. Dades imprescindibles per a efectuar posteriors càlculs amb els materials piezoelèctrics.

### 11.3.1. Estudi del medi

#### Tipus de pluja:

- Dèbils: Quan la seva intensitat es menor o igual que 2mm./h
- Moderades: Quan la seva intensitat es major que 2 mm./h y menor o igual que 15mm./h
- Fortes: Quan la seva intensitat és major que 15 mm./h y menor o igual que 30mm./h
- Molt fortes: Quan la seva intensitat es major que 30mm./h y menor o igual que 60mm./h
- Torrencials: Quan la seva intensitat es major que 60.

Font: Aemet (Agencia Estatal de Meteorologia)

Les dades són donades en mm/h, per tal d'efectuar els càlculs ens interessa tenir aquestes dades en litres/metre quadrat, tot i que per que l'equivalència sigui certa, cal dividir aquest litres/metre quadrat per hora.

$$\frac{mm}{hora} = \left( \frac{Litres}{m^2} \right) / hora$$

### 11.3.2. Càlculs sobre el tipus de pluja.

#### **Litres per m2 i hora.**

A continuació es presenta una taula relacionant el tipus de pluja amb els litres per metre quadrat a l'hora. Per a efectuar els càlculs s'ha pres el valor més elevat de l'interval d'intensitat de pluja.

*Taula 19: Litres per metre quadrat i hora per a cada tipus de pluja.*

Tipus pluja	(L/m2 )/ h
Dèbil	2
Moderada	15
Forta	30
Molt Forta	60
Torrencial	90

#### **Nombre de gotes per m2 i hora.**

Sabuts els litres en per m2 per hora també podem saber el nombre de gotes per metre quadrat per hora, per fer aquest càlcul cal tenir en compte tres factors :

*Primer :*

La conversió següent: 1 Litre = 1.000.000 mm<sup>3</sup>

*Segon:*

A través d'una relació lògica, s'ha assignat un tipus de pluja amb un tipus de gota com es mostra a continuació.

*Taula 20: Tipus de gota per cada tipus de pluja.*

Tipus gota	Tipus pluja
Molt petita	Dèbil
Petita	Moderada
Mitjana	Forta
Gran	Molt forta
Molt gran	Torrencial

*Tercer:*

Cada tipus de gota té un volum, que ja s'ha justificat en pàgines anteriors veure taula 12..

Sabudes aquestes dades tant sols cal aplicar la següent fórmula per trobar el nombre de gotes.

$$\text{Numero de gotes} = \frac{\text{Litres per m}^2 * 1000000}{\text{Volum de gota}} \quad (82)$$

Taula 21: Nombre de gotes.

Tipus pluja	(L/m <sup>2</sup> )/h	Nº gotes/h
Dèbil	2	59.683.103,66
Moderada	15	28.647.889,76
Forta	30	7.161.972,44
Molt Forta	60	916.732,47
Torrencial	90	795.774,72

### Gotes per segon en m<sup>2</sup> (Freqüència).

Per saber el nombre de gotes per segon en un metre quadrat, tant sols cal dividir el nombre de gotes que hem obtingut anteriorment, per 3600.

$$\text{Gotes per segon en m}^2 = \frac{\text{Nombre de gotes/h}}{3600} \quad (83)$$

Taula 22: Nombre de gotes per segon per metre quadrat.

Tipus pluja	Nº gotes per segon en m <sup>2</sup>
Dèbil	16.578,64
Moderada	7.957,75
Forta	1.989,44
Molt Forta	254,65
Torrencial	221,05

## 11.4. Quadre Resum de les dades obtingudes:

A continuació es presenta una quadre on es resumeix totes les dades i valors obtinguts fins el moment.

Taula 23: Resum valors obtinguts 1.

Tipus gota	Diàmetre [mm]	Volum [mm <sup>3</sup> ]	Massa [g]
Molt petita	0,4	0,0335	3,3510E-05
Petita	1	0,523	5,2360E-04
Mitjana	2	4,188	4,1888E-03
Gran	5	65,449	6,5450E-02
Molt gran	6	113,097	1,1310E-01

Taula 24: Resum valors obtinguts 2.

Vel terminal[m/s]	Quantitat moviment [kg·m/s]	Increment temps [s]	Força [N]
1,30	4,356E-08	3,077E-04	0,0001
4,00	2,094E-06	2,500E-04	0,0084
6,50	2,722E-05	3,077E-04	0,0885
9,00	5,890E-04	5,556E-04	1,0603
9,80	1,108E-03	6,122E-04	1,8103

Taula 25: Resum valors obtinguts 3.

Tipus pluja	L/m2 / h	Nº gotes/h	Nº gotes per segon en m2
Dèbil	2	59.683.103,66	16.578,64
Moderada	15	28.647.889,76	7.957,75
Forta	30	7.161.972,44	1.989,44
Molt Forta	60	916.732,47	254,65
Torrencial	90	795.774,72	221,05

## 11.5. Càlculs piezoelèctrics aplicació pluja.

Partint de les premisses que s'està treballant amb forces d'un valor baix i per tant cal obtenir la major càrrega possible per unitat de força; i que per tal d'aconseguir un bon funcionament del generador piezoelèctric, la pressió que aquest rep ha de ser aplicada de la forma més uniforme possible; s'han seleccionat una sèrie d'actuadors piezoelèctrics per tal de calcular la tensió de sortida que aquests oferirien al ser sotmesos als rangs de força determinats en l'apartat anterior.

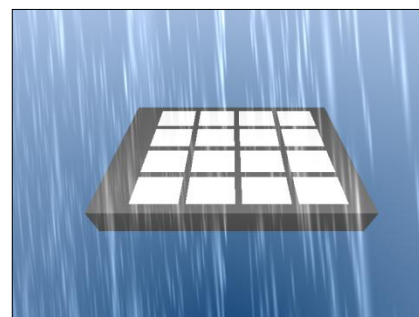


FIGURA 43: Vista 3D Piezo pluja.

D'acord amb les condicions exposades anteriorment, el criteri de selecció dels piezoelèctrics s'ha realitzat en base al fet de tenir un coeficient  $d_{33}$  el més elevat possible i unes mides prou reduïdes per poder rebre les pressions de les gotes d'aigua de forma uniforme. Les propietats i característiques principals de cada actuator seleccionat, es poden trobar en l'Annex 4 –Característiques i especificacions d'actuadors piezoelèctrics. D'altra banda, degut a que la superfície de l'aplicació no és una constant, s'ha determinat, en funció de les mides de cada actuator piezoelèctric, el nombre d'elements que es necessitarien per unitat de superfície. Aquest, és un factor important ja que serà el que més pes tindrà en el preu de l'aplicació. (Veure pressupost)

Per tal de simplificar la notació en les taules de resultats, la taula 27 mostra el nom atorgat a cadascuna de les forces amb que es treballarà.



Taula 26:Llegenda dels noms de cada força.

Força	Nom	Valor (N)
Gota molt petita	F8	0,0001
Gota petita	F9	0,0084
Gota mitjana	F10	0,0885
Gota gran	F11	1,0603
Gota molt gran	F12	1,8103

Les següents taules mostren els valors de tensió obtinguts per a cadascun dels actuadors escollits.

Actuador	CMAPO1	CMAPO2	CMAPO9	PL033.30	PL055.30
Fabricant	Noliac	Noliac	Noliac	Piceramic	Piceramic
C [nF]	500	1460	440	80	250
d <sub>33</sub> [pC/N]	37950	39100	10200	13600	14400
Mida [mm]	3x3x2	5x5x2	10x10x2	3x3x2	5x5x2
Nombre d'unitats/cm <sup>2</sup>	11	10	1	11	10
V <sub>F8</sub> [mV]	0,007	0,002	0,002	0,017	0,005
V <sub>F9</sub> [mV]	0,637	0,224	0,194	1,428	0,483
V <sub>F10</sub> [mV]	6,717	2,37	2,051	15,04	5,097
V <sub>F11</sub> [mV]	80,47	28,39	24,57	180,25	61,07
V <sub>F12</sub> [mV]	137,4	48,48	41,96	307,75	104,27

## 11.6. Conclusions i comentaris sobre els resultats.

- Els valors de tensió de sortida obtinguts, són insuficients per aprofitar l'energia generada. A més, cal tenir en compte que aquests valors es veurien reduïts considerablement a l'associar un condensador d'emmagatzematge al sistema, el qual és un component indispensable per a poder condicionar el senyal de sortida i fer-lo útil per a l'alimentació de dispositius.
- Entenem que no és productiu estudiar la incorporació d'una etapa elevadora de tensió, ja que els valors de tensió obtinguts difícilment superarien la tensió llindar dels díodes que la componen.
- Cal atribuir el baix valor dels nivells de tensió de sortida obtinguts per als diferents actuadors al baix valor de la força aplicada sobre els elements

piezoelèctrics. Aquest fet ens porta a concloure que aquesta aplicació no és útil de la manera en que s'ha plantejat. Caldria valorar si la força derivada de l'impacte de les gotes de pluja en una superfície és suficient per poder-la aprofitar d'alguna manera i, en tot cas, replantejar la manera com s'ha enfocat l'aprofitament d'aquesta energia.

# **CAPÍTOL 12:**

## **DESENVOLUPAMENT**

### **DE L'APLICACIÓ DELS**

### **COTXES.**

#### **12.1. Descripció de l'aplicació.**

Aquesta aplicació consistiria en instal·lar elements piezoelèctrics en l'asfalt dels carrers d'una ciutat. Per tal d'aconseguir un aprofitament màxim, l'emplaçament ideal dels captadors piezoelèctrics seria els passos de zebra, de manera que tant les forces produïdes pels vehicles al circular, com les produïdes pels vianants al caminar, servien per a generar energia elèctrica, la qual podria ser utilitzada per alimentar sistemes tals com semàfors o sensors presents en la via pública.

En la figura 44 es pot apreciar una vista en 3D de l'aplicació plantejada.



*FIGURA 44: Vista 3D Piezo carreteres.1*



FIGURA 46: Vista 3D Piezo carreteres.2

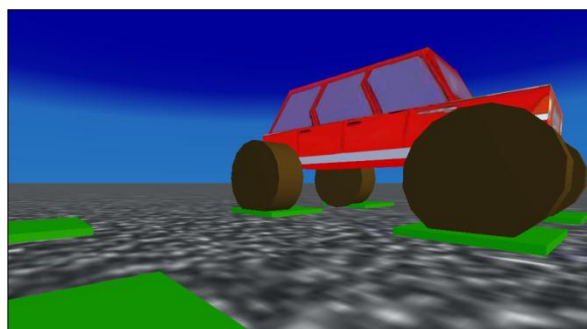


FIGURA 45: Vista 3D Piezo carreteres.3

## 12.2. Recol·lecció d'energia dels cotxes i vianants d'una ciutat.

Cal diferenciar dues parts en aquest estudi. D'una banda, s'analitzaran les forces que genera una persona al caminar, i, de l'altra, les forces que rep l'asfalt quan un vehicle hi circula per damunt.

## 12.3. Estudi físic sobre el vianants.

Aquest capítol pretén fer un estudi teòric i estadístic sobre la massa de la població espanyola, com també de la força que exerceix sobre la superfície del terra. Dades que ens serviran per a posteriors càlculs amb els materials piezoelèctrics

### 12.3.1. Estudi del medi.

#### **Massa i altura mitjana de la població espanyola.**

Segons l'estudi "Estadísticas históricas de España en los siglos XIX y XX" Fundació BBVA, any 2007:

Taula 27: Altura mitjana de l'home i dona espanyol.

Altura mitjana de l'home espanyol adult [m]
1,76m
Altura mitjana de la dona espanyola adulta[m]
1,61m

Amb aquestes dades, deduïm la mitjana de la població adulta, suposant que hi ha paritat entre el nombre de dones i el nombre d'homes.

$$altura_{mitjana} = \frac{1,76 + 1,61}{2} = 1,685 \text{ m} \quad (84)$$

Segons la Societat Espanyola de Nutrició Comunitària, l'índex de massa corporal (IMC) mitjà de la població espanyola és:

$$IMC_{mitjà} = 25,5 \text{ kg/m}^2$$

### 12.3.2. Càlculs sobre la massa i la força.

#### **Massa mitjana.**

Sabent que l'IMC s'expressa com la massa de la persona dividida pel quadrat de la seva altura, i tenint en compte les dades sobre l'alçada mitjana de la població adulta espanyola, podem determinar la seva massa mitjana:

$$IMC = \frac{\text{massa}}{\text{altura}^2} \rightarrow \text{massa} = IMC \cdot \text{altura}^2 \quad (85)$$

$$\text{massa} = 25,5 \cdot 1,685^2 = 72,4 \text{ kg}$$

#### **Força mitjana.**

Si observem la representació dels moviments que fa una persona al caminar, veiem que aquesta, va recolzant el seu pes sobre una de les dues cames alternativament. Existeix un temps en que les dues cames contacten amb el terra simultàniament, però aquest instant és molt reduït en comparació amb el temps en únicament hi ha recolzada una cama. Per tant, aquest estudi es centrarà en els moviments 2, 3, 4 i 5 de la figura.

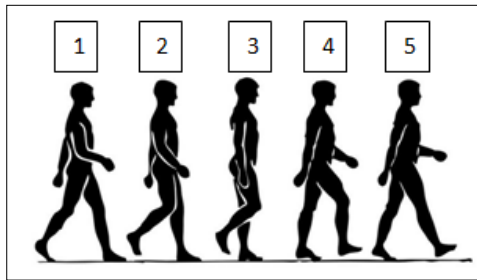


FIGURA 47: Seqüència de moviments al caminar.

Observant els moviments en estudi, veiem que el peu comença recolzant-se pel taló (2) i just abans de que la persona aixequi la cama el seu pes es recolza en la part davantera del peu (4-5). Suposarem que el generador piezoelèctric té una superfície suficientment gran per abarcar tot el peu i, per tant, no tindrem en compte aquesta variació en la localització del pes.

Tenint en compte els aquests aclariments, podem procedir a plantejar el problema, tal com es mostra en la figura 48:

Sabent que:

$$P = mg \quad (86)$$

$P$  = pes de la persona.

$m$  = massa de la persona

$g$  = acceleració de la gravetat



FIGURA 48: Diagrama de forces al caminar.

Podem determinar que la força aplicada sobre l'element piezoelèctric serà:

$$P = mg = 72,4 \cdot 9,81 = 710,244 \text{ N} \quad (86.1)$$

## 12.4. Càlculs sobre la massa i la força dels vehicles.

### 12.4.1. Determinació de les forces

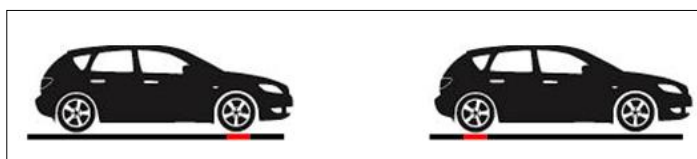


FIGURA 49: elements piezoelèctrics instal·lats en l'asfalt.

La línia vermella de les figures 49, representa un element piezoelèctric instal·lat a l'asfalt (o uns cm per sota). Quan un vehicle circuli pel seu damunt, l'element piezoelèctric rebrà dues forces que permetran generar electricitat: una quan les rodes de davant el trepitgen, i una altra quan ho fan les rodes del darrere.

Per determinar les forces sobre l'element piezoelèctric, cal estudiar per separat els eixos davanters i del darrere dels vehicles. Tot i que el plantejament serà el mateix per ambdós eixos, aquesta distinció ens permetrà contemplar la distribució de masses especificada en apartats anteriors.

La figura 49, mostra el diagrama de forces en un eix del vehicle:

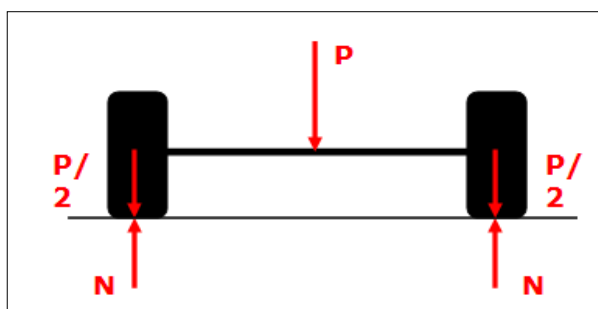


FIGURA 50: Diagrama de forces en l'eix d'un vehicle.

En la figura 50 veiem com el pes es distribueix de forma simètrica entre les dues rodes de l'eix, de manera que l'element piezoelèctric ubicat sota cadascuna de les rodes, rebrà una força de valor  $P/2$ .

El valor numèric de  $P/2$  serà diferent per a cada eix dels diferents tipus de vehicle estudiats, i el determinarem de la següent manera:

$$\frac{P}{2} = \frac{m \cdot g}{2} \quad (87)$$

$P$ : Pes aplicat sobre l'eix

$m$ : Massa suportada per l'eix

$g$ : acceleració de la gravetat

Aplicant la fórmula anterior a cadascun dels vehicles estudiats (Veure Annex 2. Estudi de trànsit a la ciutat de Barcelona.), obtenim la taula 29.

Taula 28: Força a cada eix en funció del vehicle.

Vehicle	P/2 eix davanter (N)	P/2 eix darrere (N)
Turisme	7474,53	4914,12
Motocicleta	533,07	799,61
Vehicle comercial	12837,36	8558,24
Autobús	114777	76518
Camió de 2 eixos	32569,2	37572,3

## 12.5. Càlculs piezoelèctrics aplicació en carrers.

El criteri de selecció dels captadors piezoelèctrics per a l'aplicació en estudi, passa per tenir present que la majoria de les forces calculades en l'estudi físic corresponent, superen de forma infranquejable els valors de força de ruptura habituals dels materials piezoelèctrics ceràmics. Així doncs, una solució a aquest problema seria utilitzar elements piezoelèctrics del tipus PVDF, els quals són d'origen polimèric i poden ser

sotmesos a pressions elevades.

Aquest tipus de materials, presenten una capacitat de generació d'energia per unitat de força (coeficient  $d_{33}$ ) molt més reduïda en comparació amb la que poden assolir alguns actuadors ceràmics multicapa. Aquest fet però, es podria veure contrarestat per l'elevat valor de les



FIGURA 51: Piezocarretera.

forces que es preveu que actuïn sobre els captadors piezoelèctrics. A més, pels motius exposats anteriorment, les elevades pressions previstes en aquesta aplicació redueixen molt les possibilitats en la selecció del material.

D'acord amb les condicions exposades anteriorment, el criteri de selecció dels piezoelèctrics s'ha realitzat en base al fet de tenir un coeficient  $d_{33}$  el més elevat possible. Les propietats i característiques principals de cada actuator seleccionat, es poden trobar en l'Annex 4 – Característiques i especificacions d'actuadors piezoelèctrics.

Per tal de simplificar la notació en les taules de resultats, la taula 30 mostra el nom atorgat a cadascuna de les forces amb que es treballarà.

*Taula 29: Llegenda dels noms de cada força.*

Força	Nom	Valor (N)
Cotxe davant	F12	3737,265
Cotxe darrere	F13	2457,06
Moto davant	F14	266,535
Moto darrere	F15	399,805
Vehicle Comercial davant	F16	6418,68
Vehicle comercial darrere	F17	4279,12
Autobús davant	F18	57388,5
Autobús darrere	F19	38259
Camió 2 eixos davant	F20	16284,6
Camió 2 eixos darrere	F21	18786,15

Degut a que la configuració d'un sistema d'aquest estil variarà en funció del consum que es necessiti alimentar, en el present apartat es presenta una situació concreta a mode d'exemple, de manera que el sistema ha estat optimitzat per tal d'abastir un consum corresponent a una bateria amb les característiques següents:

*Taula 30: Característiques de la bateria.*

Tensió de càrrega	3 V DC
Capacitat	500 mAh
Energia emmagatzemada màxima	5400 J

Suposant una instal·lació com la mostrada en la figura 52 (croquis) ubicada en el tram París-Còrsega del carrer Compte d'Urgell de Barcelona, i una associació segons la figura 53 dels piezofilms que integren la instal·lació; els resultats de generació energètica diària serien els presentats en la taula 32 i els temps de càrrega de la bateria en funció de l'actuator utilitzat serien els indicats en la taula 33.



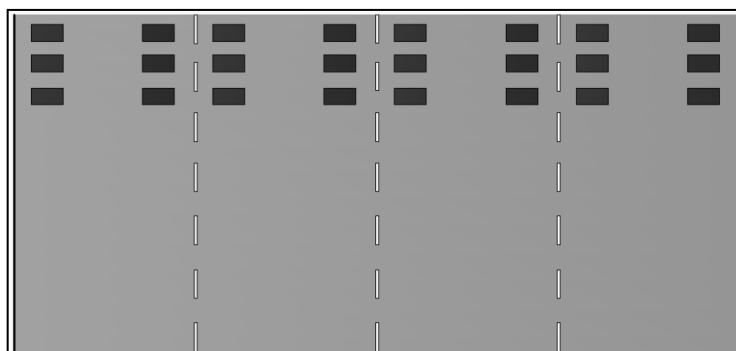


FIGURA 52: Croquis de la distribució dels elements

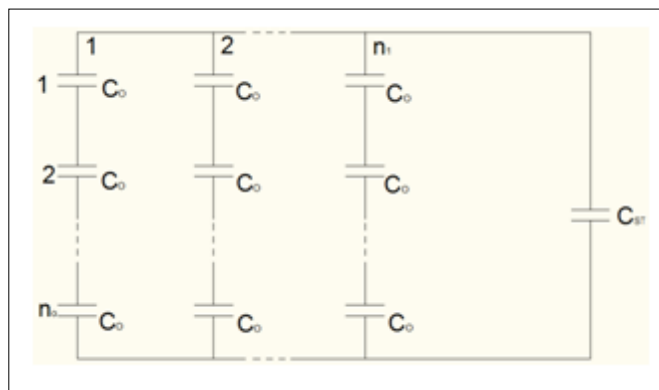


FIGURA 53: Esquema d'associació mixta de piezoelèctrics.

Taula 31: Energia generada en un dia.

Piezofilm	$n_0$	$n_1$	$C_{eq1}$ (nF)	$E_{total}$ (mJ)
P(VDF-TrFE) Copolymer 70/30 – 20 $\mu\text{m}$ thickness	5	10	102	1922,84
P(VDF-TrFE) Copolymer 70/30 – 25 $\mu\text{m}$ thickness	4	13	132,56	2500,31
P(VDF-TrFE) Copolymer 70/30 – 40 $\mu\text{m}$ thickness	3	17	144,5	3922,59

Taula 32: Temps de càrrega de la bateria.

Piezofilm	Temps (h)
P(VDF-TrFE) Copolymer 70/30 – 20 $\mu\text{m}$ thickness	67,4
P(VDF-TrFE) Copolymer 70/30 – 25 $\mu\text{m}$ thickness	51,83
P(VDF-TrFE) Copolymer 70/30 – 40 $\mu\text{m}$ thickness	33,03

Els processos de càlcul seguits així com les consideracions fetes per tal d'arribar a aquests resultats es detallen en Annex 3. Càlculs.

## 12.6. Conclusions aplicació cotxes.

- El fet de que en aquesta aplicació tots els elements piezoelèctrics siguin pressionats de forma simultània, és una avantatge en el sentit de que dóna marge per poder valorar l'associació en sèrie dels piezoelèctrics.
- S'ha pogut comprovar que l'associació mixta de piezoelèctrics dóna peu a la possibilitat de controlar la tensió de sortida del sistema i la seva capacitat equivalent. Aquest fet obra les portes a trobar una solució de compromís que permeti establir una associació de piezoelèctrics òptima en funció del dispositiu o consum que es vulgui abastir.
- Els valors d'energia obtinguts en el cas estudiat fan inviable l'aplicació ja que aquesta requereix una gran inversió econòmica (veure pressupost) i la generació d'energia és escassa per a la inversió requerida. Per aquest motiu, el balanç energètic realitzat inicialment, s'ha dut a terme de forma simplificada, sense tenir en compte una sèrie de factors que hauria calgut considerar en el cas de que el balanç energètic inicial hagués estat indicatiu de que l'aplicació era viable. Aquests factors són, per exemple, el consum dels components electrònics complementaris per tal d'adaptar el senyal a les condicions de consum.
- En el cas de l'aplicació estudiada, no s'han obtingut els resultats desitjats. Aquest fet es deu al baix valor del coeficient  $d_{33}$  que presenten els films piezoelèctrics que s'han seleccionat. En aquest sentit, caldria cercar en el mercat un producte que presentés unes millors característiques de generació i pugues suportar les forces previstes en l'aplicació. Cal dir que, tot i que en el desenvolupament d'aquest projecte no s'ha arribat a conèixer, aquest producte existeix, ja que diverses empreses han aconseguit desenvolupar aplicacions semblants amb èxit.

# **CAPÍTOL 13:**

## **CONCLUSIONS**

### **GENERALS BLOC II.**

- En les tres aplicacions plantejades, hi ha hagut un paràmetre que ha limitat de forma determinant la viabilitat de l'aplicació, ja sigui en termes de generació, econòmics o ambdós. En el cas de les aplicacions del telèfon mòbil i la pluja, aquest paràmetre ha estat el baix valor de les forces incidents en els elements piezoelèctrics. Com a conseqüència d'aquests baixos valors, les tensions de sortida obtingudes no són útils en termes de reaprofitament d'energia per les raons exposades en les conclusions concretes de cada aplicació. En el cas de la instal·lació de piezo films en carrers per tal de captar l'energia dels cotxes quan circulen, el factor que ha convertit en inviable l'aplicació ha estat el baix valor del coeficient  $d_{33}$  dels films seleccionats. Com a conseqüència d'aquest fet, la generació energètica que realitzaria el sistema seria molt pobra davant la forta inversió que requeriria la instal·lació.
- Els mals resultats obtinguts en aquest bloc, es deuen a dos fets. D'una banda, les limitacions que actualment presenta la tecnologia piezoelèctrica, les quals encasellen la utilització de materials piezoelèctrics en aplicacions molt concretes en el camp de la recollida d'energia. D'altra banda, també ha influït en els resultats el nostre desconeixement inicial sobre la tendència del mercat dels piezoelèctrics i els productes i solucions que aquest ofereix. Aquesta desconexió ens ha dut a plantejar d'una manera poc efectiva l'obtenció d'energia en els casos del telèfon mòbil i la pluja i a una mala selecció de materials en el cas de l'aplicació en carrers.

- Tot i que replantejant les hipòtesis desenvolupades o utilitzant altres materials es millorarien els resultats, aquesta millora seria limitada i en cap cas garantiria la viabilitat de l'aplicació. Aquest fet és indicatiu del gran salt que suposa passar de la teoria a la pràctica, ja que a nivell pràctic, a l'hora de desenvolupar una aplicació, a part de les limitacions tècniques i econòmiques que presenten els propis piezoelèctrics, cal sumar-hi la necessitat de controlar una sèrie de variables i limitacions relacionades amb la integració de l'aplicació en el medi.
- En els casos del telèfon mòbil i la pluja, la possibilitat de millorar la capacitat de generació del sistema, passaria per utilitzar piezoelèctrics del tipus *bender* en un muntatge del tipus *cantilever* (voladís). Les característiques i propietats d'aquest muntatge s'expliquen en el Bloc III del present projecte.
- En el cas de l'aplicació en carrers la millora més important en aquest cas consistiria en buscar un material capaç de suportar les pressions previstes en aquesta aplicació i que presentes una capacitat de generació per unitat de força (coeficient  $d_{33}$ ) més elevada que la dels materials que s'han seleccionat en el cas estudiat. L'existència d'aquest producte queda demostrada pel fet que algunes empreses han estat capaces de desenvolupar sistemes semblants al que s'ha desenvolupat en el present projecte obtenint millors resultats.

# **Bloc III: Replantejament de les aplicacions.**

# **CAPÍTOL 14:**

## **INTRODUCCIÓ DEL**

### **BLOC III.**

Com ja s'ha comentat en les conclusions del Bloc II, l'energia útil recol·lectada a través de l'impacte directe d'una força en un piezoelèctric és molt pobre, especialment en aquelles aplicacions on la força és petita (Hipòtesis pluja i mòbil) no obstant els resultats són més acceptables quan es tracta de forces elevades sempre i quant el material utilitzat presenti unes bones qualitats de generació d'energia per unitat de força aplicada (Hipòtesis cotxe).

Com ja s'ha comentat en la introducció d'altres blocs, el camí que ens ha dut a aquesta conclusió ha estat ple de dificultats, on la constant s'ha centrat en cercar informació, adquirir coneixement i fer ús de l'enginy, per tal de tirar endavant aquest projecte d'investigació.

Forçosament aquestes conclusions feien replantejar les hipòtesis i intentar donar un altre enfoc a la recol·lecció d'energia de l'entorn mitjançant piezoelèctrics. El fet de poder contactar amb persones que treballen en el sector de desenvolupament d'aplicacions amb piezoelèctrics, ens ha ajudat a veure el problema des d'un altra perspectiva.

La forma en que s'utilitza l'energia provocada per una força puntual és la clau d'aquest nou plantejament de les hipòtesis, el què expliquem consisteix essencialment en aprofitar aquesta força per a fer oscil·lar quelcom que està adherit a un piezoelèctric tipus Bender, amb aquest mètode s'aconsegueix augmentar de forma significativa l'energia recaptada.

Així doncs el tercer i últim Bloc d'aquest projecte es centra en els piezoelèctrics tipus Bender i el replantejament de les hipòtesis anteriors en aquesta direcció.

# **CAPÍTOL 15:**

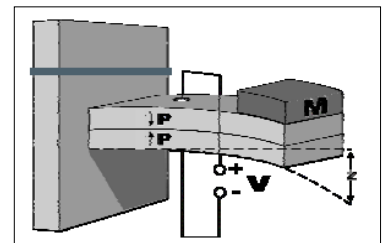
# **PIEZOELÈCTRICS**

## **TIPUS BENDER.**

Aquests elements piezoelèctrics, tenen la característica de permetre una certa flexió ja que el material piezoelèctric del que estan formats ho permet. És a través d'aquesta flexió o deformació que el material genera càrregues elèctriques a les seves cares (efecte piezoelèctric directe) o pel contrari si s'aplica una tensió aquest es deforma (efecte piezoelèctric invers).

El muntatge en el qual un piezoelèctric tipus Bender està subjecte per un extrem, s'anomena Cantilever (voladís) i és una de les configuracions més comuns per aprofitar les prestacions d'aquest tipus de piezoelèctrics. No obstant algunes empreses han desenvolupat altres sistemes, com ara els Benders en forma d'anell el qual la deformació es produeix al centre.

La configuració Cantilever dels piezoelèctrics tipus Bender té grans avantatges en el camp de Energy Harvesting, ja que accepta el moviment oscil·latori. Per tant, si es dissenya un sistema on l'energia d'un cop es transforma en un moviment oscil·latori, es pot aprofitar de forma més eficient aquesta energia per transformar-la en càrrega elèctrica a través de piezoelèctrics tipus Bender.



*FIGURA 54: Piezoelèctric tipus Bender*

## 15.1. Monomorph, Bimorph, Multimorph.

El primers Beneders en aparèixer cronològicament, van ser els Monomorph i Bimorph. Tal i com indica el seu nom, els Monomorph estan formats per una capa de material piezoelèctric mentre que els Bimorph en tenen dues. Anys després van aparèixer els piezoelèctrics multicapa i en conseqüència també va aparèixer els Benders multicapa o Multimorph.

### 15.1.1. Monomorph.

Aquests Benders estan formats per una capa piezoceràmica i una capa elàstica, la qual permet regular la deformació de la capa piezoelèctrica.

Al aplicar una força en l'extrem del Bender aquest pateix esforços de tracció i compressió provocant així una deformació del material piezoelèctric i en conseqüència l'obtenció de càrregues en les cares del material.

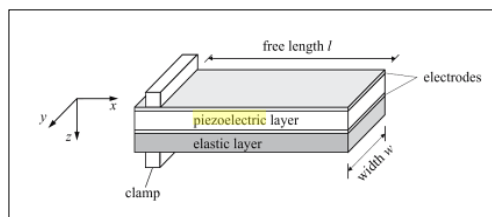


FIGURA 55: Bender monomorph.

En la figura 56 és mostra com a l'aplicar una tensió, el Bender es deforma. Normalment l'ordre de magnitud de la tensió aplicada a aquests elements per a obtenir deformació, és de 200 volts.

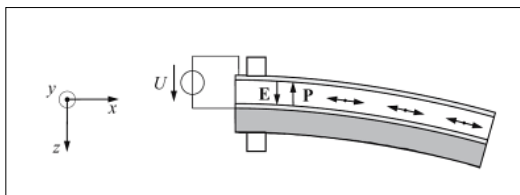


FIGURA 56: efectes al aplicar una força en un Bender.

### 15.1.2. Bimorph.

Aquest tipus de Bender es pot considerar com un successor del Monomorph, ja que la característica principal està en substituir la capa elàstica per una capa piezoelèctrica. Per tant a l'aplicar un esforç en l'extrem del bender, una de les làmines piezoelèctriques patirà esforços de tracció i l'altre de compressió, per tant amb la mateixa força aplicada es pot obtenir més energia útil.

Es poden connectar les dues làmines del Bender Bimorph de dues maneres, en sèrie o paral·lel. Es considera que està en paral·lel si la direcció de la polarització del material piezoelèctric de les dues capes coincideix, el resultat es que

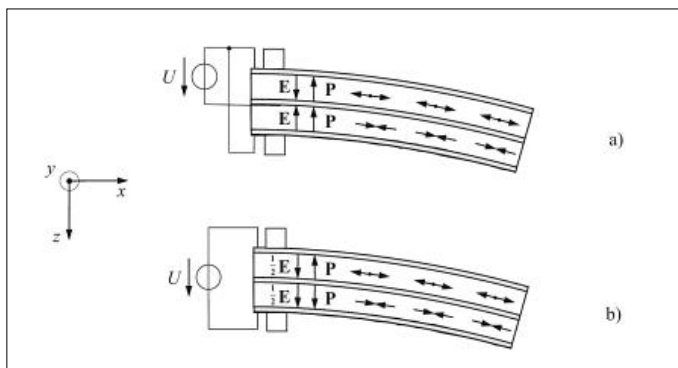


FIGURA 57: Efectes al aplicar una força a un Bender Bimorph.

al aplicar una força en l'extrem una capa pateix esforços de compressió i l'altre de tracció per tant la càrrega



elèctrica (o camp elèctric) generat esta oposat en direcció (Figura A). Si es fa l'analogia amb fonts de tensió, aquestes estan connectades en paral·lel.

Si pel contrari la polarització de les dues làmines estan en direccions oposades, la càrrega (camp elèctric) està en la mateixa direcció per tant serà un Bimorph sèrie (Figura B). Si es fa l'analogia amb fonts de tensió aquestes estan connectades en sèrie.

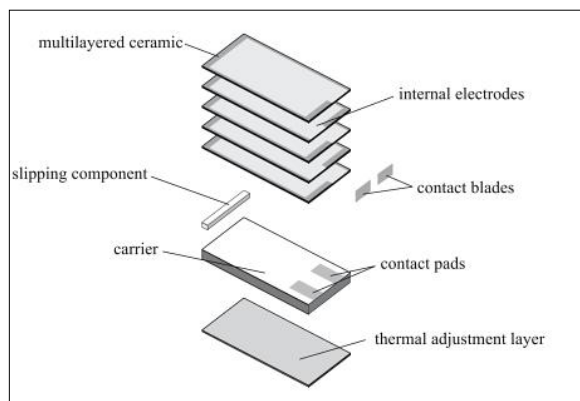
El Bender Bimorph tot i tenir dues capes és considera com tecnologia piezoelèctrica monocapa.

### *15.1.3. Multimorph*

Aquest tipus de Bender es pot considerar un Monomorph on la capa piezoceràmica és un material piezoelèctric multicapa. Aquest Bender permet obtenir més càrrega elèctrica de la mateixa força aplicada que en qualsevol altre tipus de Bender, com també permet la mateixa deformació que la resta de Benders però a una tensió molt més baixa de l'ordre d'uns 20 volts, és a dir unes 10 vegades menys que un Monomorph.

De la mateixa manera que els Benders Bimorph tenen dos formes de connexió, els Benders multicapa també ofereixen aquesta possibilitat, el concepte és el mateix, si les làmines tenen la polarització en la mateixa direcció s'obté una connexió paral·lel, en canvi si les làmines tenen la polarització oposada s'obté una connexió sèrie.

A efectes pràctics s'utilitza la connexió paral·lel (mateixa direcció de polarització), per aplicacions destinades a la recollida d'energia. S'utilitza la connexió sèrie (direcció oposada de polarització) en aquelles aplicacions on interessa utilitzar el piezoelèctric com actuator.



*FIGURA 58: Detall d'un Bender multimorph.*

## **15.2. Freqüència de ressonància:**

Els materials piezoelèctrics ofereixen millor resposta quan es treballa a freqüència de ressonància, no obstant el valor d'aquesta normalment es molt elevat (de l'ordre de Mhz) i és fa difícil poder treballar a aquesta freqüència des del punt de vista de l'efecte piezoelèctric directe. En el cas particular d'utilitzar els piezoelèctrics per a la recollida d'energia, es fa especialment complicat treballar a la freqüència de ressonància ja que resulta quasi impossible aplicar forces o oscil·lacions de l'ordre de Mhz.

No obstant els piezoelèctrics tipus Bender permeten modificar la freqüència de ressonància. Com ja s'ha comentat en aquest projecte un piezoelèctric es pot modelitzar amb el següent circuit elèctric. On L ve determinada per la massa del

cristall, C per la elasticitat mecànica mentre que la R per la fricció interna piezoelèctric (pèrdues).

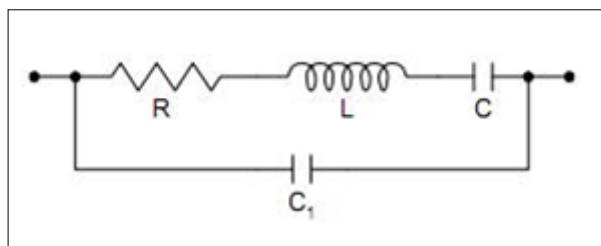


FIGURA 59: Circuit equivalent d'un piezoelèctric.

La freqüència de ressonància sèrie d'aquest circuit es determina a través de:

$$F_r = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (88)$$

La C està relacionada amb el coeficient d'elasticitat mecànica, per tant es una paràmetre que no es pot alterar, en canvi la L la qual està relacionada amb la massa del piezoelèctric si és possible modificar-la, adjuntant al piezoelèctric una petita massa. Per tant la configuració del Bender, permet integrar aquesta massa addicional, i en conseqüència disminuir el valor del freqüència de ressonància.

### 15.3. Càlculs i simulació de piezoelèctrics tipus Bender.

Aquest tipus d'elements piezoelèctrics són força complexos d'analitzar, ja que incorporen el factor de la flexió de l'element piezoelèctric, per aquest motiu el mètode de càlcul és més complex que en els piezoelèctrics comuns.

Per a efectuar els càlculs pertinents de forma fiable cal un programa d'elements finits per tal de considerar tots els factors necessaris. A més, calen certs coneixements de programació per tal de poder modelitzar l'element piezoelèctric en algun d'aquests programes. Per tal de donar resposta a aquest inconvenient, existeix software de pagament que incorpora de forma predefinida la modelització de piezoelèctrics. Un d'aquest programes, és l'Atila, el qual funciona en l'entorn GID i ha estat desenvolupat per una empresa que treballa en el sector de la piezoelectricitat.

### 15.4. Tendència cap el Bender.

Aquests elements són un gran avenç en el món de la Energy Harvesting, ja que al permetre moviments oscil·latoris es pot optimitzar el sistema de recollida d'energia. En els piezoelèctrics comuns, es pot aprofitar l'energia generada per un impacte o un cop, en canvi amb els Benders, es pot utilitzar aquest impacte per a fer oscil·lar quelcom que estigui adherit al Bender aprofitant molt més l'energia del impacte i per tant generant molta més càrrega elèctrica.

Es per aquest motiu que actualment les empreses centrades en el desenvolupament d'aplicacions de recollida d'energia amb piezoelèctrics, fan els seus dissenys pensant en aquest concepte, el de fer oscil·lar un element piezoelèctric (Bender) per a obtenir energia.

Els piezoelèctrics com a generadors no han tingut una gran acollida a causa de les seves limitacions, el concepte és molt bo però els resultats limitats, no obstant sembla ser que amb els Benders la idea està canviant i es possible que el gran "Boom" que alguns creuen que han de fer els piezoelèctrics com a generadors d'energia estigui en els Benders, o si més no en el concepte d'obtenir energia no del impacte sinó de l'oscil·lació.

# **CAPÍTOL 16:**

## **REPLANTEJAMENT DE.**

### **LES HIPÒTESIS AMB**

### **BENDER.**

En els apartats que segueixen s'explica les línies generals del replantejament de les hipòtesis del mòbil i la pluja.

No s'ha tractat el tema en profunditat per dues raons, la manca de temps i per què desenvolupar aquest replantejament suposaria feina com per un altre projecte final de carrera. No obstant hem cregut convenient comentar de forma general algunes idees d'integració dels Benders en les hipòtesis d'aquest projecte.

#### **16.1. Replantejament hipòtesis mòbil.**

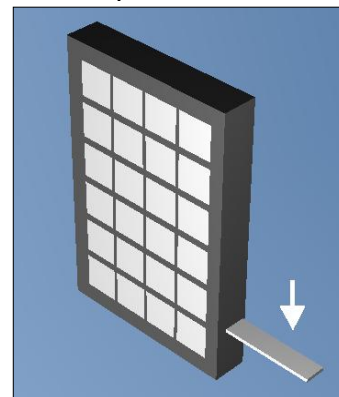
Una forma bàsica d'integrar els piezoelèctrics tipus Bender amb format cantilever al mòbil seria col·locar el piezoelèctric dins el telèfon i que d'aquest sobresortís algun element el qual rebés les forces, provocant una oscil·lació i per tant una generació de càrrega elèctrica per part del piezoelèctric.

Aquesta idea es podria desenvolupar encara més i optimitzar per a que aquest sistema funcionés correctament al caminar, on creiem que realment podria ser útil, ja que normalment portem el telèfon mòbil a sobre i per tant cada cop que féssim un trajecte amb ell l'estaríem carregant. Si aquesta idea funcionés

aportaria un salt qualitatiu força interessant al telèfon mòbil, ja que s'aconseguiria una gran autonomia d'aquest dispositiu tant necessari avui en dia.

Per altra banda cal ser realistes i entenem que la integració d'aquest sistema de captació d'energia al mòbil és realment complicada, ja que per una banda ens trobem que per poder integrar tot el sistema al mòbil caldria forçosament un increment del volum d'aquest, cosa que va en contra de les tendències actuals. No obstant l'obstacle més determinant d'aquesta aplicació és l'element sobresortint el qual s'hauria d'adjuntar al mòbil, creiem que aquest element podria provocar força molèsties a l'usuari i per tant seria de difícil implementació. Tot i això s'hauria de fer un estudi per a determinar i

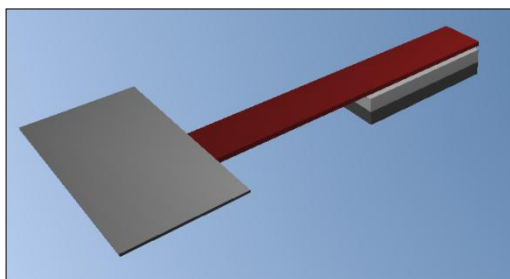
corroborar aquestes hipòtesis.



*FIGURA 60: Disseny replantejament piezo mòbil.*

## 16.2. Replantejament hipòtesis pluja.

La implementació dels piezoelèctrics tipus Bender en la hipòtesis pluja ofereix més possibilitats, ja que l'entorn es més propici per a integrar elements sobresortints.



*FIGURA 61: Disseny replantejament piezo pluja.*

Una hipòtesis concreta es basaria en integrar elements sortints com es mostra en la figura 61, en les cornises dels edificis d'una ciutat. Així quan plugués, aquests elements oscil·larien de tal forma que el Bender podria genera càrrega. Aquest disseny de l'element sortint no tant sols és aplicable a les ciutats, sinó que també permet integrar-ho en d'altres indrets, com per exemple en sensors aïllats els quals obtindrien una certa autonomia.

Un avantatge d'aquesta configuració per a captar energia de l'entorn, és que permet obtenir energia no només quan plou sinó també quan hi ha vent, ja que aquest provocaria que l'element sortint oscil·lés i per tant que generés càrrega.

## 16.3. Altres idees.

### **Piezoarbre:**

La captació d'energia a través de l'oscil·lació i no pas de l'impacte, permet reconsiderar altres hipòtesis plantejades en aquest projecte. Un exemple és el piezoarbre, aquesta idea pren sentit si considerem que un objecte cilíndric llarg i estret com es mostra en la figura 62 oscil·la al estar sotmès a la força del vent. Si en la base d'aquest objecte cilíndric hi col·loquem uns piezoelèctrics cilíndrics aquest rebrien la pressió del moviment de l'objecte oscil·lant i per tant podrien

generar càrrega. A priori aquesta aplicació es considera força viable i relativament senzilla de dur a terme.

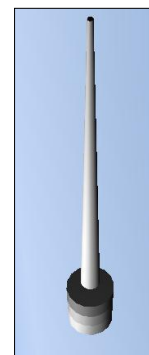


FIGURA 62: Disseny piezoarbre.

## 16.4. Conclusions.

- A mode de conclusió creiem que integrar piezoelèctrics tipus Bender per a la recol·lecció d'energia a través del mòbil no és una forma útil d'aconseguir autonomia energètica per part d'aquest dispositiu, els motius com ara la gran dificultat per a integrar aquest sistema de generació en el mòbil, o la incomoditat que a priori l'hi suposaria a l'usuari tenir un element sortint del mòbil, ens donen a concloure que no seria una aplicació viable.
- L'aplicació de la pluja sembla ser un replantejament viable, ja que la seva elaboració i estudi podria ser més aviat senzilla, sobretot si s'utilitzen les dades i resultats obtinguts en aquest projecte. Tot i això, cal remarcar que els reduïts valors de força amb que treballaria l'aplicació seguirien limitant els resultats.
- Considerar l'obtenció d'energia a través dels piezoelèctrics mitjançant el moviment oscil·latori i no pas de la força d'un impacte, com també tenint en compte el Bender com a configuració de piezoelèctrics més adient per a la captació d'aquesta energia, permet obrir un ampli ventall de possibilitats que van més enllà d'aquest projecte. No obstant i pel que s'ha investigat, aquesta configuració aporta bons resultats i és una de les formes més òptimes per generar energia a través dels materials piezoelèctrics.
- Aquest capítol ha presentat un esbós d'algunes idees, les quals es podrien desenvolupar o formar part de l'objecte de projecte d'altres projectes finals de carrera. Creiem que aquesta línia d'investigació és molt vàlida per a desenvolupar futures aplicacions amb resultats exitosos. Així que animem als lectors d'aquest projecte a pensar, imaginar, i desenvolupar en noves aplicacions en la línia presentada en aquest capítol, ja que considerem que és una de les formes més idònies de treure profit de les peculiars característiques dels materials piezoelèctrics.

# **CAPÍTOL 17:**

## **CONCLUSIONS DEL**

## **PROJECTE.**

Les següents conclusions tracten sobre el projecte i el seu desenvolupament en termes generals, ja que les conclusions i comentaris referents a aspectes més tècnics i concrets es poden torbar al final de cadascun dels apartats corresponents del present projecte.

En primer lloc, cal mencionar que realitzar un projecte d'investigació i desenvolupament, no és una tasca fàcil, i menys quan, com en el nostre cas, es parteix des de zero, de manera que la primera fase del projecte consisteix en assolir uns coneixements i conceptes previs que, en el cas que ens ocupa són considerablement extensos i, alguns d'ells, poc evidents.

També cal remarcar que el salt de la teoria a la pràctica mai és fàcil i, és en aquesta segona fase quan apareixen les vertaderes dificultats, ja que cal controlar un gran nombre de variables i factors diversos i fer front als problemes i obstacles que van sorgint.

En aquest sentit, el desenvolupament d'un projecte d'aquest tipus es pot complicar de forma considerable en funció del nombre de variables i consideracions que es contemplin. En el present projecte, s'ha intentat adaptar aquest grau de dificultat en el seu desenvolupament als nostres coneixements i al temps disponible.

Un altre aspecte remarcable d'aquest projecte és que avarca diferents disciplines de l'enginyeria, tals com la física, l'electrotècnica, l'electrònica o l'estadística. Aquest fet també influeix en la magnitud del projecte, ja que cadascuna d'aquestes disciplines és un món i el fet de combinar-les, ens ha obligat a marcar uns límits a l'hora de treballar en cadascun d'aquests camps.

En relació amb els anterior paràgrafs, cal dir que els límits fins a on cal aprofundir en cadascun dels camps que avarca el projecte i la informació realment útil de cara al desenvolupament d'aplicacions, no es troba tant als llibres sinó en les empreses i persones que porten temps treballant en el sector de la piezoelectricitat i coneixen la direcció i fase del seu desenvolupament. En aquest sentit, el nostre projecte no ha estat una excepció i ha estat el contacte amb persones que posseeixen el *know-how* suficient el que ens ha ajudat a marcar la línia a seguir.

Per últim, cal afegir que la realització d'aquest projecte ens ha servit per prendre consciència de que la piezoelectricitat és tot un món i que, encara que sigui poc conegut per a la majoria de les persones, és un sector que actualment ja té moltes aplicacions pràctiques, i el qual es troba en plena fase de desenvolupament, amb molta gent treballant i investigant al seu darrere.



# **CAPÍTOL 18:**

# **CONCLUSIONS**

# **PERSONALS.**

Una de les constants d'aquesta vida és l'equilibri entre les circumstàncies positives i negatives que ens ofereix, i aquest projecte no s'escapa d'aquesta constant, el regust en acabar aquest projecte és agredolç.

Estem molt satisfets per la feina feta, ja que em estat capaços d'afrontar i superar els obstacles que han anat apareixent al llarg d'aquest any de projecte, hem revisat i recuperat els apunts presos durant la carrera per que el projecte ho requeria, hem sigut constants a l'hora de cercar integrar i assimilar els nous coneixements que el projecte ens demanava, hem confiat amb el company per que sabíem que on l'un no arribava l'altre sí; personalment aquesta experiència ens satisfà i entenem que em fet la feina ben feta.

D'altre banda i des del punt de vista d'Enginyer, sabem que els resultats obtinguts són dolents inclús més dels que ens esperàvem inicialment, som conscients que les aplicacions desenvolupades són inviables, almenys tal i com estan dissenyades i amb els recursos actuals.

Tot i això ens omple pensar que em estat coherents amb la nostre manera de pensar, entenem que per evolucionar, per tenir un futur més sostenible, cal, investigar, arriscar, pensar, desenvolupar, ser creatius.

En el sector energètic cal aportar noves idees, cal innovar, entenem que és una necessitat massa important per a la raça humana com per no arriscar i desenvolupar altres fonts que ens aportin aquesta energia tan necessària avui en dia. Nosaltres ho hem intentat i teníem moltes esperances dipositades en aquest projecte, però malauradament els resultat obtinguts no són suficients per a considerar-ho com una solució viable, no obstant s'han obert altres portes, molt interessant i sembla ser que ofereixen un futur piezoelèctric més prometedor,

però per a que això sigui possible cal treballar, apostar i invertir en aquestes iniciatives.

Normalment un projecte final de carrera d'Enginyeria no dóna peu a reflexionar i molt menys a la filosofia, per aquest motiu i per decantar el regust agre-dolç cap el dolç, als autors d'aquest projecte ens satisfaria que aquestes darreres reflexions no quedessin en el record, sinó que motivin als lectors d'aquest humil document, per a què pensin i reflexionin sobre els comentaris exposats en aquestes darreres pàgines, i quina possibilitat té cadascú de nosaltres per tirar endavant iniciatives innovadores per al bé comú.

# **CAPÍTOL 19:**

# **BIBLIOGRAFIA**

## 19.1. Bibliografia de Consulta

### **LLIBRES**

- [1] William D. Callister, Jr, INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES, TOMO II, Editorial Reverté, Barcelona, 1996.
- [2] Donald R. Askeland, Pradeep P. Phulé, CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES, CUARTA EDICIÓN, Thomson Editores, Mèxic, 2004.
- [3] J.F. Nye, PHYSICAL PROPERTIES OF CRYSTALS. THEIR REPRESENTATION BY TENSORS AND MATRICES, Oxford Science Publications, Oxford, 1985
- [4] William F. Smith, FUNDAMENTOS DE LA CIENCIA E INGENIERIA DE MATERIALES, TERCERA EDICIÓN, McGraw-Hill, Madrid, 1999
- [5] Carreras de Odriozola, Albert, Tafunell Sambola, Xavier, ESTADÍSTICAS HISTÓRICAS DE ESPAÑA, SIGLOS XIX-XX, Fundación BBVA, Madrid, 2006
- [6] C. Donald Ahrens, METEOROLOGY TODAY. SIXTH EDITION, Thomson Learning, USA, 2000

### **ARTICLES**

- [7] López García, Oscar, Carnicero López, Alberto, Ruíz Pablos, Rosa, MATERIALES INTELIGENTES(II): APLICACIONES TECNOLÓGICAS, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, 2004
- [8] Roman Guigon, Jean-Jacques Chaillout, Thomes Jager, Ghislain Despesse, HARVESTING RAINDROP ENERGY: THEORY, Grenoble (França), 2008
- [9] Venet Zambrano, Michel, Alves Pereira, Antônio Henrique, MATERIAIS E DISPOSITIVOS PIEZOELÉCTRICOS: FUNDAMENTOS E DESENVOLVIMENTO, ATCP do Brasil, São Carlos (Brasil), 2004
- [10] Christian Peters, Jonas Handwerker, Dominic Maurath, Yiannos Manoli, AN ULTRA-LOW-VOLTAGE ACTIVE RECTIFIER FOR ENERGY HARVESTING APPLICATIONS, University of Freiburg, Germany
- [11] Seung Nam Cha, Ju-Seok Seo, Seong Min Kim, Hyun Jin Kim, Young Jun Park, Sang-Woo Kim, Jong Min Kim, SOUND-DRIVEN PIEZOELECTRIC NANOWIRE-BASED NANOGENERATORS, National Research Foundation of Korea, Korea, 2010.

### **CATÀLEGS**

- [12] HIGH PERFORMANCE CERAMICS IN PIEZO APPLICATIONS, Ceramtec
- [13] MONOLITHIC MULTILAYER ACTUATORS. OPERATION AND APPLICATIONS, Ceramtec
- [14] NOLIAK STANDARD PRODUCTS, Noliac
- [15] PIEZOELECTRIC FILMS. TECHNICAL INFORMATION, Piézotech S.A.S.

## **PROJECTES**

- [16] Ovejas Benedicto, Victòria Júlia, CAPTACIÓ D'ENERGIA DE L'ENTORN MITJANÇANT ELEMENTS PIEZOELÈCTRICS, Castelldefels, 2008
- [17] Fermosel Benjumea, Jordi, DISSENY D'UN MICROGENERADOR AMB LÀMINES PIEZOELÈCTRIQUES, Barcelona, 2010
- [18] Sánchez Muñoz, Almudena María, ESTUDIO Y ANÁLISIS DE SENSORES Y ACTUADORES PIEZOELÉCTRICOS PARA APLICACIONES REOMÉTRICAS, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 2006
- [19] Cosín Andradas, David, DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROTOTIPO DE UN SENSOR BASADO EN MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, 2006
- [20] Vázquez Carzo, Alfredo, NOVEL PIEZOELECTRIC TRASDUCERS FOR HIGH VOLTAGE MEASUREMENTS, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2000

## **ALTRES DOCUMENTS I ESTUDIS**

- [21] DADES BÀSIQUES 2009 v.03, Ajuntament de Barcelona, Barcelona, 2010
- [22] PIEZO FILM SENSORS. TECHNICAL MANUAL, Measurement Specialties, Inc., Norristown (USA), 1999

## **PÀGINES WEB**

- [23] [www.mmech.com](http://www.mmech.com)
- [24] [www.noliac.com](http://www.noliac.com)
- [25] [www.piceramic.com](http://www.piceramic.com)
- [26] [www.ceramtec.com](http://www.ceramtec.com)
- [27] [www.meas-spec.com](http://www.meas-spec.com)
- [28] [www.physikinstrumente.com](http://www.physikinstrumente.com)
- [29] [www.ingeniohm.com](http://www.ingeniohm.com)
- [30] [www.efunda.com](http://www.efunda.com)